Sétra

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

n° 64 - juillet 2010

Ouvrages d'art



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent pour l'avenir

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer

Page laissée blanche intentionnellement



SOMMAIRE

Bulletin du Centre
des Techniques d'Ouvrages d'Art

OUVRAGES MARQUANTS

RÈGLEMENTATION, CALCULS

LE KIOSQUE DU SÉTRA

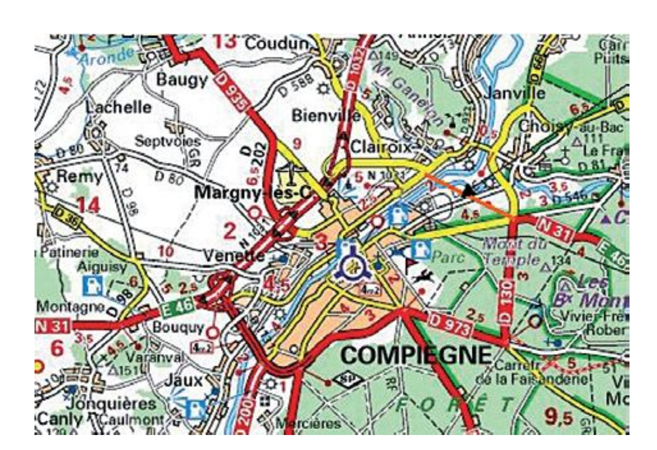
Directeur de la publication : Philippe Redoulez. **Comité de rédaction :** Emmanuel BOUCHON (Sétra/CTOA/DGOI) - tél : 02 99 78 47 10, Jean-Christophes CARLES (CETE Méditerrannée/DISTOA/DOA) - tél : 04 42 24 76 86, Bruno Godard (LCPC/DFDOA) - tél : 01 40 43 53 32, Thierry KRETZ (Sétra/CTOA) - tél : 01 46 11 32 58, Gilles LACOSTE (Sétra/CTOA/DGP) - tél : 01 46 11 32 92, Angels Luis MILLAN, (Sétra/CTOA/DCSL) - tél : 01 46 11 32 41, PAILLUSSEAU Pierre (CETE du SUD-OUEST/DOA) - tél : 05 56 70 67 03, -Benoît PORTIER (DRE PACA/SMO) - tél : 04 91 00 53 35. **Rédacteur en chef :** Benjamin Blasco (Sétra/CTOA/DCSL) - tél : 01 46 11 32 45. **Conception graphique et réalisation :** SCEI
ISSN : 1266-166X /Pascale Giraud (Sétra)

Le viaduc de Compiègne sur la RN31

Les Eurocodes en marche sur un ouvrage construit à l'avancement – Partie 2

Fernando Dias, Renaud Léglise

Dans le Bulletin Ouvrages d'Art n° 63, les premières phases de la conception du viaduc de Compiègne sur la RN31 qui relie Rouen à Reims avaient été détaillées, permettant d'expliquer les choix relatifs à sa géométrie, à sa structure et à ses équipements. L'article qui suit se concentre sur les études techniques de l'ouvrage, l'un des premiers à avoir été dimensionné aux Eurocodes, puis revient en détail sur la méthode de construction à l'avancement qui a été mise en œuvre.



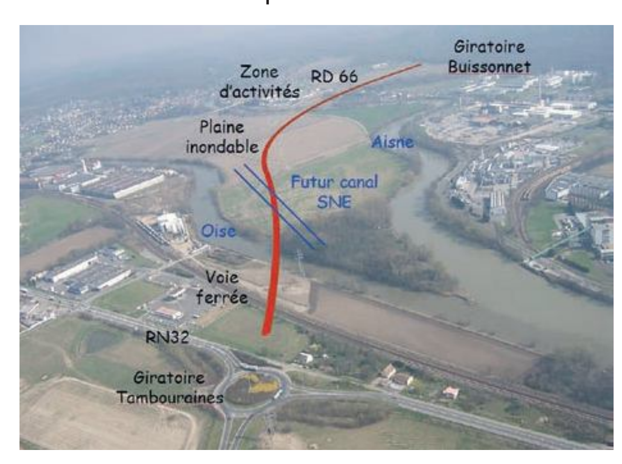


Figure 1 : Localisation de l'ouvrage et identification de la brèche à franchir - Sources : carte viamichelin, photo DIR Nord

Hypothèses et calculs de dimensionnement de l'ouvrage

L'ouvrage est conçu et calculé pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans.

Textes de référence

En phase projet, l'ouvrage (à l'exception des fondations) a été dimensionné aux Eurocodes, dont la rédaction des textes européens nécessaires était achevée à l'époque et celle des annexes nationales bien avancée.

Les normes qui ont été appliquées sont les suivantes :
- NF EN 1990 – Eurocode 0 – Base des calculs ;
- NF EN 1991 – Eurocode 1 – Actions sur les structures ;
  - Partie 1 : actions générales (1-1 : actions dues au poids propre, 1-4 : actions dues au vent, 1-5 : actions thermiques, 1-6 : actions en cours d'exécution, 1-7 : actions accidentelles dues à des impacts ou à des explosions) ;

- Partie 2 : actions du trafic sur les ponts ;

• NF EN 1992 – Eurocode 2 – Calcul des structures en béton ;
- Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments ;
- Partie 2 : ponts en béton.

Dans l'attente de l'annexe nationale de l'Eurocode 7 (EC7) sur le calcul géotechnique et des normes nationales complémentaires, nécessaires à son application, les fondations ont été vérifiées selon le fascicule 62 titre V du Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG). Depuis janvier 2008, la note d'information n° 30 du Service d'études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (Sétra) a par ailleurs confirmé la pertinence de cette démarche.

Toutefois, les pieux ont été dimensionnés sur la base des descentes de charge calculées aux Eurocodes 0 et 1, des efforts horizontaux de l'Eurocode 1-2 (freinage) et des chocs latéraux de bateaux de l'Eurocode 1-1-7, pour les appuis implantés dans des voies navigables, c'est-à-dire dans l'Oise, l'Aisne et le canal SNE.

Matériaux

Les caractéristiques des matériaux sont les suivantes :

• béton de classe C40/50 : les lois de comportement du retrait et du fluage sont conformes à l'EC2 ;

• aciers passifs FeE500 de classe B (ductilité normale en l'absence de risque sismique) ;

• aciers de précontrainte :
- propriétés définies dans l'Agrément Technique Européen (ATE) et l'EN10138 ;
- classe 2 : torons basse relaxation ;
- coefficients de frottement conformes à l'EN 1992-1-1 :
  - câbles intérieurs : $\mu = 0.19\ rad^{-1}$ et $k = 0.01\ rad.m^{-1}$;
  - câbles extérieurs : $\mu = 0.12\ rad^{-1}$ (torons dans une gaine en PEHD / non graissé) et k=0.

Hypothèses de dimensionnement

L'ouvrage est dimensionné pour la deuxième classe de trafic de l'EC1-2 et pour les charges militaires de type Mc120. Aucun convoi exceptionnel n'est à considérer. Cependant, du fait de son dimensionnement, l'ouvrage sera apte à supporter le passage des convois exceptionnels des 1ère et 2e catégories mêlés au trafic routier, au sens de l'arrêté du 5 mai 2006, ainsi que les convois C1 et C2 au sens de la circulaire de 1983, circulant seuls sur l'ouvrage.

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Viaduc	EPOA	APS Validé	Arrêté DUP	PROJET - DCE		Travaux		
Publication des Eurocodes (Normes européennes : EN - Annexes nationales : NA)								
Bases de calcul EN1990		EN	NA / EN		Annexe A2 (ponts)	NA annexe A2		
Actions EN1991		EN § 1-1	NA § 1-1 EN § 2 EN § 1-5	EN § 1-4 EN § 1-6		EN § 1-7	NA § 2 NA § 1-4 NA § 1-5 NA § 1-7	NA § 1-6
Structures béton EN1992				EN § 1-1	EN § 2	NA § 1-1	NA § 2	

Figure 2 : Dates de publication des normes Eurocodes au cours de l'avancement du projet

Le tablier a fait l'objet de calculs de flexion longitudinale en fourchette (calcul simplifié en précontrainte moyenne non autorisé par l'EC2), suivant les modalités suivantes :

- pour la précontrainte intérieure : $P_{k,sup} = 1.10\ P_m$ et $P_{k,inf} = 0.90\ P_m$;
- pour la précontrainte extérieure : $P_{k,sup} = 1.05\ P_m$ et $P_{k,inf} = 0.95\ P_m$.

Concernant les actions thermiques, l'application de l'EC1-1-5 conduit à des variations linéaires de température, autour d'une température moyenne fixée à 10 °C, $\Delta T_{N,exp}$ = +26 °C (allongement) et $\Delta T_{N,con}$ = -22 °C (raccourcissement) pour le calcul des appuis et des fondations, soit une amplitude de 48 °C bien inférieure à l'amplitude forfaitaire de 70 °C habituellement prise en compte dans le règlement français. Ces variations ont été majorées de 10 °C pour le calcul des joints de chaussée et des appareils d'appuis, ce qui a conduit à $\Delta T_{N,exp}$ = +36 °C et $\Delta T_{N,con}$ = -32 °C, soit une amplitude proche cette fois de 70 °C.

Les gradients thermiques positif et négatif sont pris respectivement égaux à +10 °C et –5 °C en l'absence de revêtement et à +7 °C et –5 °C après mise en place de la couche de roulement, d'après l'EC 1–1-5. La différence essentielle avec le BPEL réside dans la prise en compte dans l'Eurocode d'un gradient thermique négatif, qui correspond à un état où l'intrados de l'ouvrage serait plus chaud que son extrados bien que la valeur du gradient soit légèrement inférieure à celle des anciens règlements.

En ce qui concerne les actions dues au vent, la vitesse de vent sur le tablier vaut 26 m/s (soit 159 kg/m²) sans trafic et 23 m/s (soit 144 kg/m²) avec trafic. Une différence essentielle de l'EC1-1-4 avec le fascicule 61 titre II consiste en la prise en compte d'un vent compatible avec la circulation.

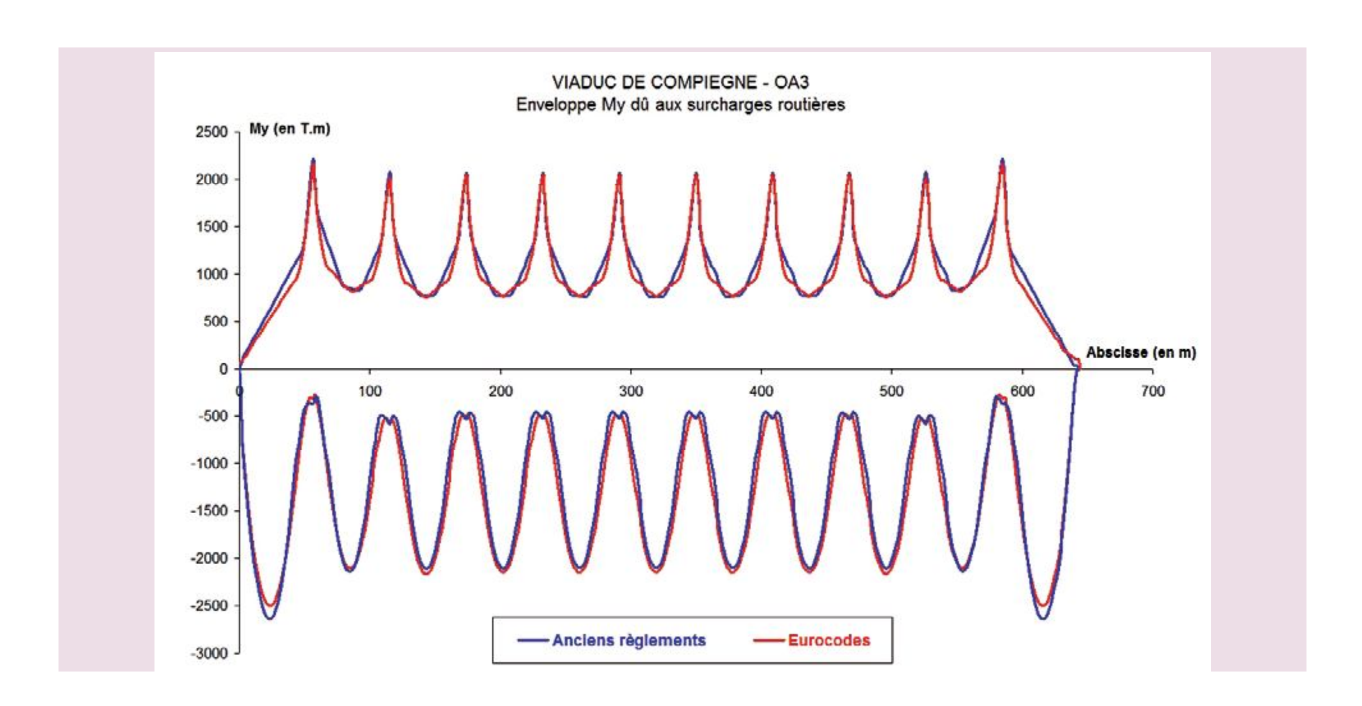


Figure 3 : Comparaison EC1-2 /. fascicule 61, titre II de l'effet des charges d'exploitation - Source : SETRA

Principes de dimensionnement

Pour un tablier construit avec des voussoirs préfabriqués respectant la géométrie de l'ouvrage achevé, l'état de l'ouvrage en service dépend très peu de la cinématique et du mode de construction. Il est très voisin de l'état calculé de l'ouvrage coulé en une seule fois sur cintre et les différences résultent des effets différés en cours de construction.

Pour le dimensionnement au niveau projet, le tablier a donc été considéré comme entièrement coulé sur cintre. Plusieurs phases de construction ont été étudiées, avec un tablier partiellement construit et la prise en compte de charges de construction. De ce fait, le projet était adapté aux différentes méthodes de construction à l'avancement.

Le critère de dimensionnement de la précontrainte consiste à obtenir la non-décompression des joints entre voussoirs à l'ELS caractéristique, du fait de l'emploi de la technique des voussoirs préfabriqués qui impose de facto une discontinuité des aciers passifs longitudinaux.

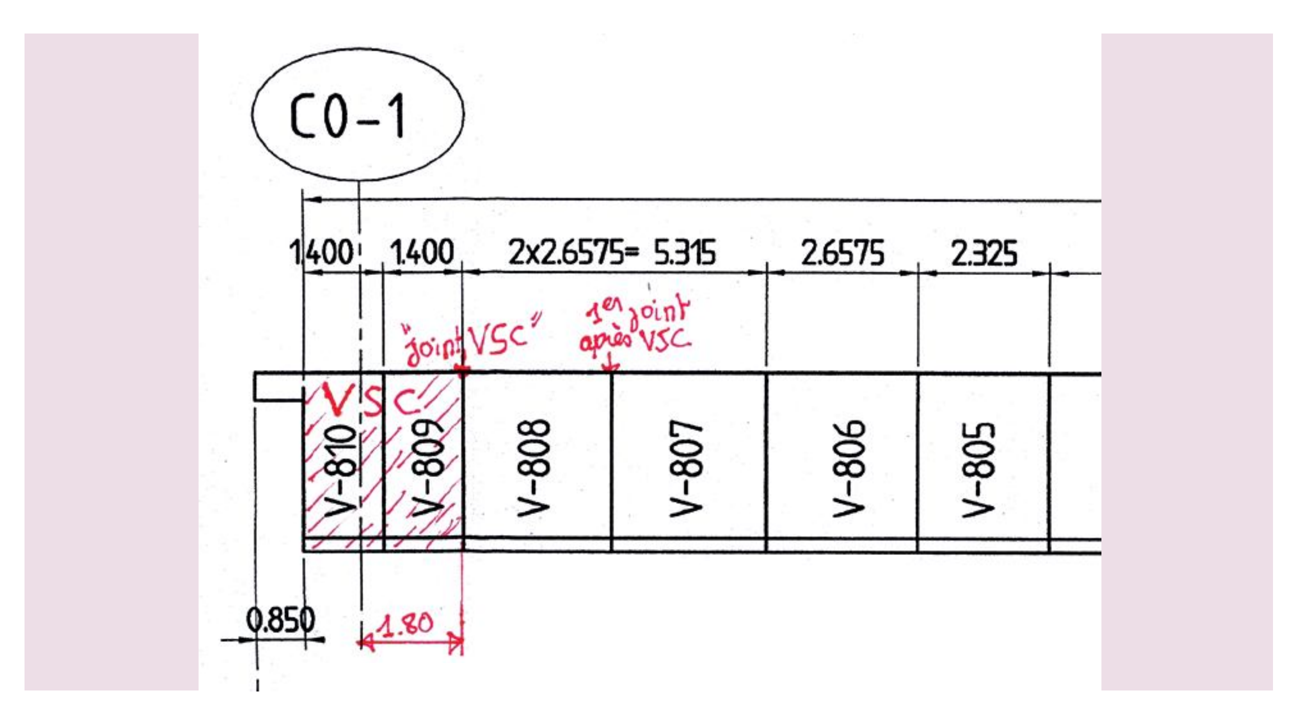


Figure 4 : Position du « joint VSC » et du «1er joint après VSC »

Incidence de l'application des Eurocodes

Globalement, l'Eurocode n'induit pas de bouleversements majeurs au niveau du dimensionnement de la précontrainte, qui est proche de celui que l'on obtiendrait au BPEL. Toutefois, si les charges dues au poids propre, aux superstructures et à la précontrainte sont très peu modifiées par les Eurocodes, les charges routières ont été revues. Il faut notamment souligner que l'EN1991-2 permet maintenant d'excentrer la voie n° 1 du modèle de charge LM1, ce qui peut modifier les résultats des calculs de dimensionnement des tabliers d'ouvrage.

Néanmoins, pour un ouvrage avec tablier en caisson, peu sensible à la torsion, ces nouvelles dispositions ont peu d'influence. Sur la figure 3, on observe, sur l'un des tabliers du viaduc de Compiègne, les enveloppes du moment fléchissant dû au modèle de charge LM1 caractéristique de l'EN1991-2 d'une part et au modèle de charge du fascicule 61 titre II du Cahier des Prescriptions Communes (CPC) d'autre part.

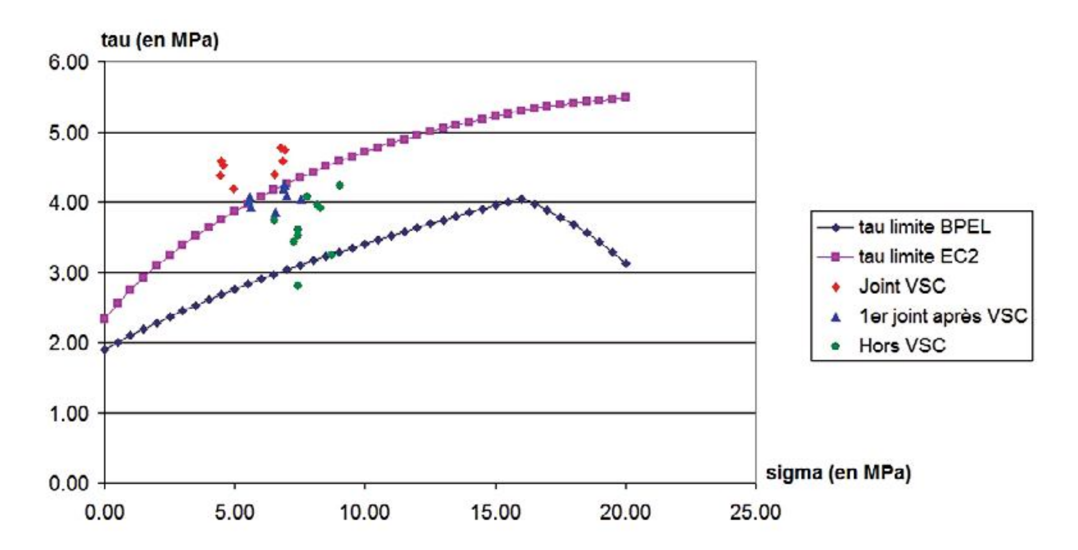


Figure 5 : Comparaison EC2/BPEL de la contrainte de cisaillement admissible

La possibilité d'avoir une épaisseur d'âme de 30 cm

Par rapport à un dimensionnement classique au BPEL, l'application des Eurocodes a permis d'affiner significativement les âmes du caisson. Leur épaisseur, habituellement prise égale à 36 cm, a pu être réduite à 30 cm, ce qui engendre un gain non négligeable sur le poids propre de la structure.

Conformément à l'article 7.3.1 (110) de l'EN1992-2, il est nécessaire de maîtriser la fissuration provoquée par le cisaillement des âmes. L'annexe nationale de l'EN1992-2 complète cet article par la clause suivante :

« Pour les structures en béton précontraint, il n'est pas nécessaire de vérifier la fissuration des âmes lorsque le critère donné dans l'annexe QQ est respecté ». L'annexe nationale confère d'ailleurs à l'annexe QQ un statut normatif.

Ce critère consiste à vérifier que :

$$-\sigma_1 \leq f_{ctb} = \left(1 - 0{,}8 \cdot \sigma_3 / f_{ck}\right) \cdot f_{ctk;0,05}$$

Les contraintes principales (σ_1 ; σ_3) peuvent être calculées de façon classique à partir des caractéristiques du cercle de Mohr, avec σ_c la contrainte normale longitudinale et σ_t la contrainte normale transversale. Dans le guide Sétra sur l'Eurocode 2, il est alors montré que le critère de l'annexe QQ de l'EN1992-2 peut se traduire par la condition d'application plus habituelle aux projeteurs, donnée en fonction de la contrainte tangente τ : ()

$$\tau^2 \leq \sigma_c \sigma_t + \frac{5 f_{ck} \cdot f_{ctk;0,05} \left(f_{ctk;0,05} + \sigma_c + \sigma_t\right)\left(5 f_{ck} - 4\sigma_c - 4\sigma_t\right)}{\left(5 f_{ck} + 4 f_{ctk;0,05}\right)^2}$$

Il est ainsi facile de calculer et de comparer la contrainte tangente admissible à l'EN1992-2 et au BPEL. Cette dernière étant donnée par l'expression suivante :

$$\tau^2 \leq \sigma_c \sigma_t + 2 f_{tj} \cdot \min\left(\frac{0{,}6 \cdot f_{cj} - \sigma_c - \sigma_t}{f_{cj}} ; 0{,}2\right) \cdot \left(f_{tj} + \frac{2}{3}\left(\sigma_c + \sigma_t\right)\right)$$

La comparaison de ces contraintes tangentes admissibles a un intérêt dans la mesure où, pour ce type d'ouvrage, l'application des charges Eurocodes ou celle des règlements « actuels » donnent des effets très proches.

Sur la figure 5 sont représentés :

• les courbes (σ_x ; τ_{adm}) calculées à partir des conditions de vérification de l'annexe QQ de l'EN1992-2 et de l'article 7.2.2. du BPEL99 (avec σ_t = 0) ;

• l'état de contraintes (σ_x ; τ) en différents points de l'âme (centre de gravité, nœud supérieur et inférieur) et sur plusieurs sections des tabliers. Ces états de contraintes sont calculés à partir du modèle PCP® utilisé par le Sétra dans le cadre du contrôle des études d'exécution.

Les points concernant le « joint VSC » (Voussoir sur Culée) sont situés sur le joint entre le voussoir sur culée et le premier voussoir courant des travées de rive. Ce joint est donc situé à 1.80 m de l'axe des appuis sur culée ou sur pile/culée (*cf* figure 4). Situé dans la zone d'influence de la bielle d'appui, à une distance inférieure à la hauteur du caisson, les calculs du cisaillement par la RDM ne sont pas significatifs, et le règlement ne demande pas de les prendre en compte, la vérification se faisant par une approche locale.

La position du «1er joint après VSC» est illustrée sur la figure 4.

La figure 5 montre que si la condition est satisfaite aux Eurocodes, elle ne l'est pas au BPEL99 avec des âmes de 30 cm.

Tous les autres points sont situés sur des joints hors des zones d'appui sur culée. Pour la plupart, ils sont situés sur des joints proches des piles. On constate que la condition est vérifiée aux Eurocodes et non respectée au BPEL®.

Dispositions constructives pour le ferraillage transversal des âmes

L'application de l'EN1992-1-1 interdit les recouvrements des aciers verticaux près de la surface des âmes.

L'article 9.2.2(3) indique : « Un recouvrement sur le brin vertical situé près de la surface de l'âme est autorisé sous réserve que le cadre ne participe pas à la résistance à la torsion ».

Par ailleurs, l'article 8.7.4.1(3) impose, en cas de recouvrement de barres d'un diamètre supérieur ou égal à 20 mm, la mise en place d'un ferraillage perpendiculaire entre ces barres et le parement béton.

Le diamètre des barres verticales était de 20 ou 25 mm. Afin de respecter les dispositions constructives vis-à-vis du diamètre de mandrin de cintrage de ces armatures et de bénéficier d'un bras de levier maximum pour reprendre la flexion transversale, il était préférable de disposer les armatures verticales d'effort tranchant en premier lit, le plus près possible du parement béton.

Afin de respecter ces deux articles de l'EN1992-1-1, l'entreprise a dû mettre en œuvre des cadres sur toute la hauteur de l'âme, sans recouvrement.

Sur plusieurs ouvrages avec tablier à caisson en béton précontraint, le ferraillage transversal des âmes est constitué par des armatures en U, en recouvrements le long des parements béton. Le ferraillage des voussoirs était composé de 2 éléments préfabriqués :

• le ferraillage du hourdis supérieur avec les U de la partie haute de l'âme ;

• le ferraillage du hourdis inférieur avec les U de la partie basse de l'âme ;

les armatures en U pouvant être facilement enfilées à travers le ferraillage des hourdis.

Il suffisait ensuite d'assembler les 2 parties en glissant les brins verticaux des U supérieurs sur ceux des U inférieurs.

Ce principe de ferraillage permettait de simplifier son exécution, notamment pour les ponts de hauteur variable, la variation de hauteur pouvant être obtenue par une variation de la longueur de recouvrement entre les 2 U.

Cette disposition n'était pas interdite par les BAEL/ BPEL. Mais elle était déjà fortement déconseillée par le guide de conception du Sétra "Ponts en béton construits par encorbellements successifs" de juin 2003.

Avec les Eurocodes, les recouvrements des aciers verticaux près la surface des âmes sont désormais interdits sur ce type d'ouvrage. D'une manière générale, les Eurocodes sont plus contraignants vis-à-vis des recouvrements proches des parements béton. Mais il est nécessaire de s'adapter à ces nouvelles dispositions qui devraient permettre une amélioration de la durabilité des ouvrages.

Enrobage des armatures passives

Il est à noter que, par rapport au BAEL, l'application de l'Eurocode 2 implique une augmentation de 5 mm de l'enrobage sur les parois les plus exposées du caisson. En effet, la classe d'exposition au sens de la NF EN 206-1 est XC4 (alternance d'humidité et de séchage) pour les parois exposées et XC3 pour l'intérieur du caisson et la face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité. Ceci conduit, en appliquant l'EC2, à des enrobages respectifs de 35 et 30 mm. Afin de simplifier l'exécution et d'éviter les erreurs sur chantier, une valeur unique de 35 mm a été retenue pour l'enrobage des armatures du tablier.

Études d'exécution du tablier

Les entreprises ont choisi de construire l'ouvrage à l'avancement, avec des voussoirs préfabriqués. Les études d'exécution du tablier aux Eurocodes, réalisées par le bureau d'études Arcadis (agence de Lyon), ont donc intégré ce mode de construction dans les modèles de calcul.

Ainsi, pour l'étude de la flexion longitudinale en service et en construction, le BE Arcadis a modélisé le tablier avec le logiciel ST1®, en prenant en compte un phasage de construction très détaillé. Ce modèle a ainsi permis d'estimer l'état de la structure à la pose de chaque voussoir préfabriqué, en fin de construction du tablier, à la mise en service et pendant la durée d'utilisation de l'ouvrage.

Le Sétra ayant été chargé du contrôle des études, il a modélisé la structure avec le logiciel PCP®, en envisageant deux phasages de construction :

• le tablier est considéré comme entièrement coulé en place en une seule phase : activation simultanée de tous les éléments du modèle avec leur poids propre ;

• la prise en compte partielle du phasage réel de construction : prise en compte de toutes les étapes d'exécution d'une travée haubanée sur certains appuis ; réalisation par travée entière sur les autres appuis (sans mât de haubanage).

Il n'était pas nécessaire pour le Sétra de réaliser un modèle aussi complet que celui du bureau d'études d'exécution pour contrôler les résultats de la note de flexion longitudinale en cours de construction. Compte tenu de la méthode de construction, avec une répétition des tâches, les cas de charges élémentaires sont toujours les mêmes. Avec des longueurs de travées identiques, les courbes des efforts se répètent d'une travée à l'autre, au cours de l'avancement de la construction. Au niveau de la travée de rive et de la travée adjacente, les courbes des efforts sont différentes à cause des "effets de bords". Mais, nous avons constaté que les différences s'atténuaient rapidement en s'éloignant des culées. Le Sétra a donc modélisé le phasage réel de construction sur les deux premières travées haubanées : construction du mini-fléau, mise en place des voussoirs, mise en tension des haubans, précontrainte, accostage sur appui,… Nous avons également modélisé ce phasage sur une travée située en partie centrale. Les autres parties de l'ouvrage ont été considérées comme construit à l'avancement par travée entière.

Dans ce type d'ouvrage, où l'état en fin de construction ne dépend que très peu du phasage de construction, il est également utile de disposer d'un modèle « entièrement coulé en place en une seule phase ». Celui-ci donne en effet une bonne approximation de l'état de l'ouvrage en « fin de construction », qui peut servir de base pour la comparaison avec les modèles plus complexes et permettre de repérer d'éventuelles erreurs grossières.

La modélisation de toutes les phases élémentaires d'un chantier complexe présente en effet des risques :

• lors de l'activation d'un élément en « géométrie absolue » (≈ coulé en place), celui-ci s'adapte à la géométrie de la structure en cours de construction. Une activation d'un élément en « géométrie relative » (≈ préfabrication) revient à placer un élément dans la continuité de la structure. Le choix n'est pas toujours évident et peut avoir des conséquences importantes sur l'état de la structure en fin de construction, notamment si l'on enferme des rotations dans la structure ;

• la modélisation des opérations de vérinage/dévérinage et de mise sur appui définitif peut également introduire des efforts inattendus. Lors de l'activation de l'élément modélisant l'appareil d'appui, celui-ci peut être « déformé » pour s'adapter à la géométrie du tablier, ou le tablier est « déformé » afin de s'adapter à la géométrie de l'appareil d'appui. Dans ce dernier cas, avec un appui simple, parfaitement glissant et libre en rotation, le tablier ne subit qu'un tassement. Mais dans le cas d'un appui fixe parfait, on risque d'imposer un déplacement longitudinal au tablier, soit un effort normal ;

• l'ordre d'activation et de désactivation de certains éléments provisoires de blocage ou de stabilité doit être analysé avec attention. Dans notre cas, par exemple, au démarrage de la construction des premières travées du premier tablier, un brêlage a été mis en place sur culée afin d'assurer la stabilité horizontale. Les premières travées étaient posées sur appuis glissants. Le brêlage était démonté après pose du tablier sur les appuis fixes situés en partie centrale du tablier. Une modélisation non-réaliste de ce phasage peut entraîner un blocage du tablier sur plusieurs points fixes. Lors de la mise en tension des câbles de précontrainte du tablier, on constate alors qu'une grande partie des efforts passent dans les appuis.

La vérification de quelques états en cours de construction et la comparaison entre modèles « complet », « partiel » et « simplifié » ont permis de corriger quelques erreurs de ce type.

Après validation, la comparaison entre le modèle ST1® d'Arcadis et les deux modèles PCP® du Sétra a montré qu'ils donnaient des résultats très proches en fin de construction, et également sur plusieurs états analysés en cours de construction.

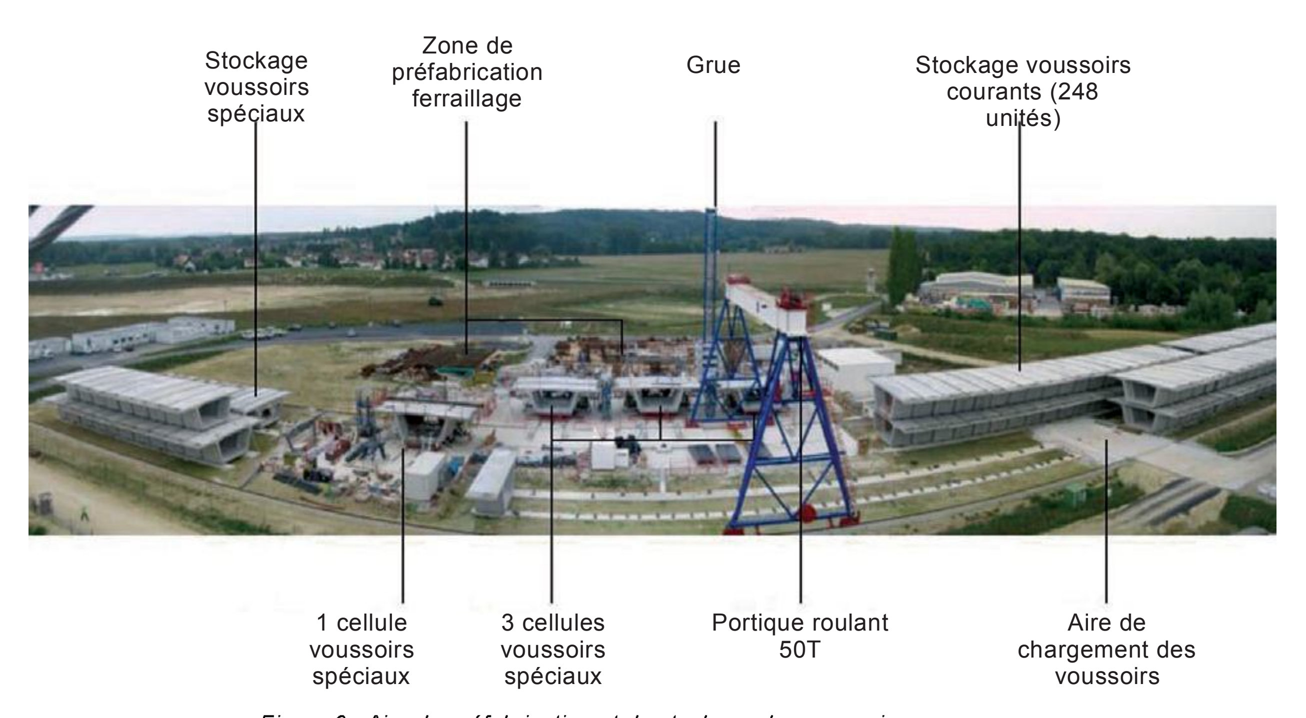


Figure 6 : Aire de préfabrication et de stockage des voussoirs - Source : VINCI

Les différences entre la modélisation d'un tablier « coulé en place » et « construit à l'avancement » sont en partie dues aux effets différés en cours de construction (fluage du béton, pertes de précontrainte, ...). Sur le tablier étudié, la travée 1 étant mise en précontrainte à une date 0, la dernière travée (soit la travée 12) est mise en précontrainte à une date d'environ 100 jours. En fin de construction, l'avancement du fluage et des pertes de précontrainte est différent suivant les travées. La comparaison des modèles montre que ces différences sont faibles et qu'elles s'estompent à long terme.

Il est très utile pour le BE d'exécution de disposer d'une modélisation « complète » du phasage de construction.

Cette modélisation lui permet notamment :

• de vérifier chaque état de la construction de l'ouvrage ;

• d'avoir un état théorique de la structure à chaque étape de la construction, et de le comparer avec l'état réel du tablier (relevé topographique) et d'adapter son modèle aux réalités du chantier (charges en cours d'exécution, caractéristiques matériaux,...) ;

• la validation rapide, en cours d'exécution, d'une modification du phasage.

Par exemple, lors des phases d'accostage, un vérinage était appliqué en extrémité de fléau pour relever le tablier à sa cote définitive sur appareil d'appui. Une flèche et une force de vérinage théoriques étaient fournies par le BE pour chaque travée. A l'accostage, le fléau haubané devait se situer à environ 8 cm en dessous de sa position définitive. La force de vérinage à appliquer était alors estimée à 80 tonnes. Or il était nécessaire de limiter cette force de vérinage afin d'éviter l'introduction d'efforts trop importants dans la structure et une ouverture des joints entre voussoirs préfabriqués. De fait, la position théorique fournie par le bureau d'études permettait de vérifier la position de la travée haubanée afin de respecter cette limitation.

Quelques différences ont pu être constatées lors de la réalisation des premières travées : la flèche mesurée était plus importante que la flèche théorique. Par la suite, la procédure de mise en tension des haubans a été améliorée. L'entreprise a mis en place un suivi géométrique de la flèche à l' extrémité du tablier pendant la pose des voussoirs et la mise en tension des haubans. Si, pendant la réalisation de la travée haubanée, l'entreprise constatait une évolution de cette flèche différente de celle théoriquement attendue, il était alors prévu d'ajuster la tension des derniers haubans (n°12 à 17) de 5 à 10 % par rapport aux tensions fournies par le bureau d'études.



Figure 7 : Cellules de préfabrication des voussoirs - Source : VINCI



Figure 8 : Haubanage du tablier - Source : CETE



Figure 9 : Potence de pose des voussoirs - Source : VINCI



Figure 10 : Pose à la grue de la première travée sur cintre - Source : VINCI

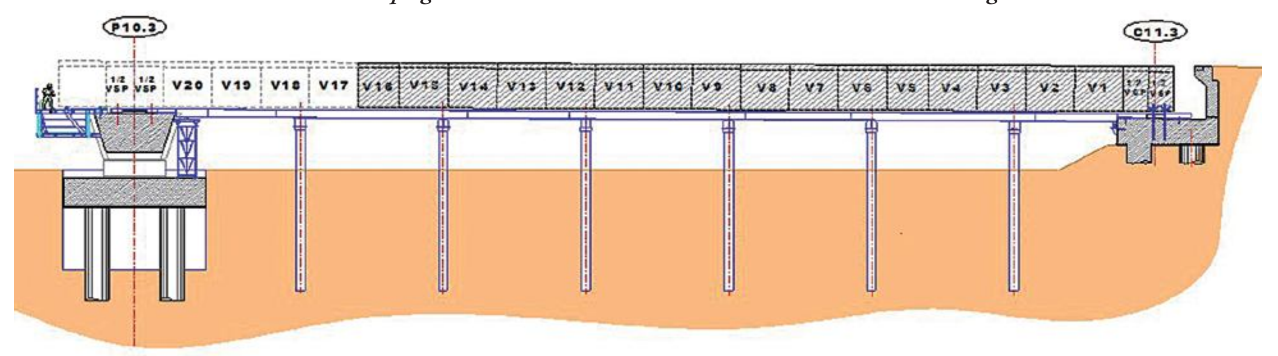


Figure 11 : Pose de la première travée sur cintre, schéma de procédure - Source : VINCI

Description de la méthode de construction

Principe de la méthode

Le principe de la construction à l'avancement consiste à construire le tablier linéairement d'une extrémité à l'autre à l'aide de matériels spéciaux, qui peuvent être un cintre général, un cintre auto-lanceur ou un mât de haubanage provisoire.

Aire de préfabrication et de stockage

La méthode de construction du tablier repose sur la préfabrication des voussoirs, leur pose étant assurée à l'aide de matériels spécifiques.

Le tablier est constitué de 810 voussoirs, à savoir : 514 voussoirs courants, 134 voussoirs dotés de bossages d'ancrage pour les câbles éclisses, 84 voussoirs déviateurs et 78 voussoirs spéciaux, c'est-à-dire les Voussoirs Sur Piles (VSP), les Voussoirs Sur Culées (VSC) et les Voussoirs Sur Joints (VSJ) situés à la jonction des tronçons de tabliers indépendants. Ils ont tous été construits sur une aire de préfabrication aménagée directement sur le site.



Figure 12 Fardier de transport des voussoirs - Source : VINCI

Cette aire se compose de trois zones :

• l'atelier de préfabrication des aciers, dans lequel sont assemblées les cages d'armatures des voussoirs ;

• le site de fabrication des voussoirs en lui-même, permettant de bétonner trois à quatre voussoirs par jour dans des « cellules » (ateliers de coffrage des voussoirs) ;

• la zone de stockage, où peuvent être entreposés 260 voussoirs dans l'attente de leur pose.

Les voussoirs sont conjugués, c'est-à-dire que chaque voussoir coulé dans une cellule de préfabrication sert de contre-moule au voussoir suivant.

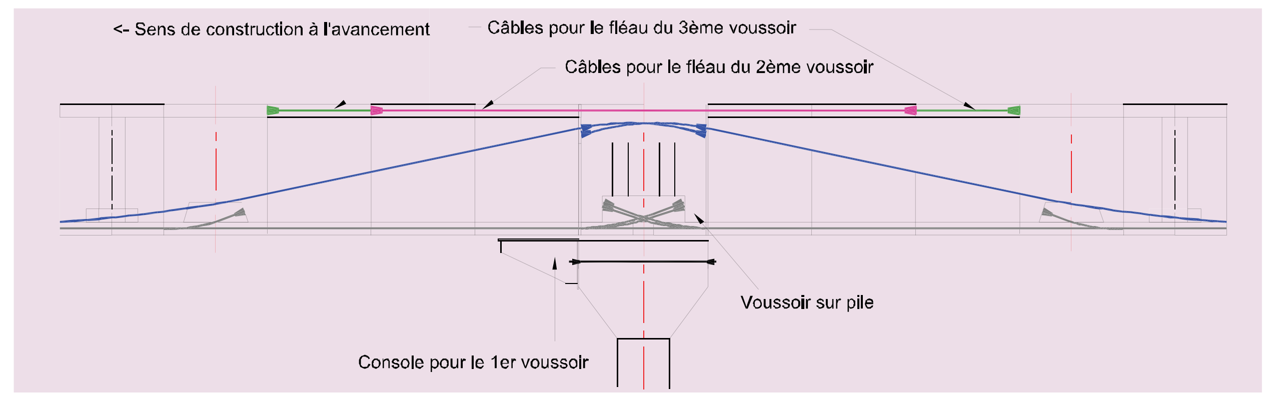


Figure 13 : Précontrainte de fléau - Source : CETE

Pour assurer une cadence de fabrication de quinze voussoirs courants et de deux voussoirs spéciaux par semaine, l'entreprise avait mis en œuvre trois cellules de préfabrication pour la fabrication des voussoirs courants (servant également à la confection des voussoirs déviateurs) et une cellule pour les voussoirs spéciaux (VSP, VSC, VSJ).

Le planning de la préfabrication du tablier était intimement lié à celui de sa pose. Il fallait en effet que l'atelier de préfabrication prenne suffisamment d'avance au départ sur l'atelier de pose, dont le rendement était plus élevé, de façon à ce que, sans jamais dépasser la capacité maximale de stockage, les derniers voussoirs posés soient âgés au moins d'une trentaine de jours.



Figure 14 : Brêlage provisoire des voussoirs - Source : CETE



Figure 15 : Mise en place d'un voussoir - Source : VINCI

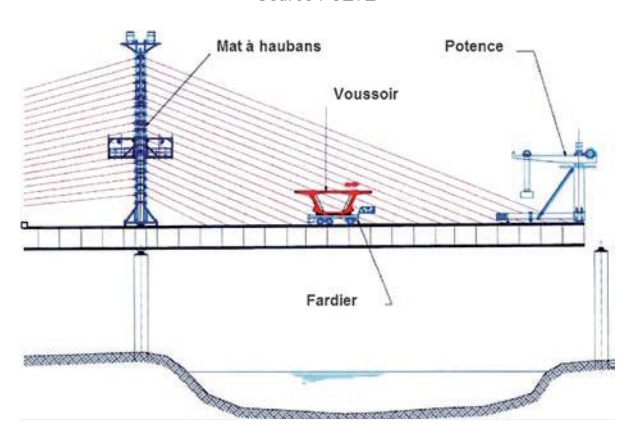


Figure 16a : Mini-fléau sur la nouvelle travée à construire et démontage du haubanage sur la travée précédente en vue de la mise en place du mât de haubanage sur la pile suivante - Source : VINCI



Figure 16b : Pose des voussoirs à l'avancement par haubanage provisoire - Source : VINCI

Méthode de pose des voussoirs

Pour la pose des voussoirs, la méthode développée par l'entreprise DODIN CAMPENON BERNARD fait appel à l'utilisation d'un mât de haubanage provisoire et d'une potence de pose.

La longueur des voussoirs était variable selon leur type : en fait, l'objectif était d'obtenir un poids de voussoir quasi-constant et proche de 50 tonnes, qui correspond à la capacité limite de la potence de pose.

La première travée a été construite sur cintre : les voussoirs étaient posés à la grue sur le cintre, brêlés puis assemblés par précontrainte.

Lorsque cette première travée a été réalisée, les voussoirs pouvaient être acheminés directement par le tablier, à l'aide d'un fardier.

Le cycle de construction d'une nouvelle travée commençait par la réalisation d'un mini-fléau : la potence était positionnée au droit du VSP et trois voussoirs étaient assemblés en porte-à-faux. Le premier voussoir était posé sur une console fixée sur le chevêtre de la pile et brêlé au VSP, après avoir subi un réglage géométrique fin assuré par un joint de clavage de quelques centimètres d'épaisseur, permettant de corriger les déplacements de la travée.

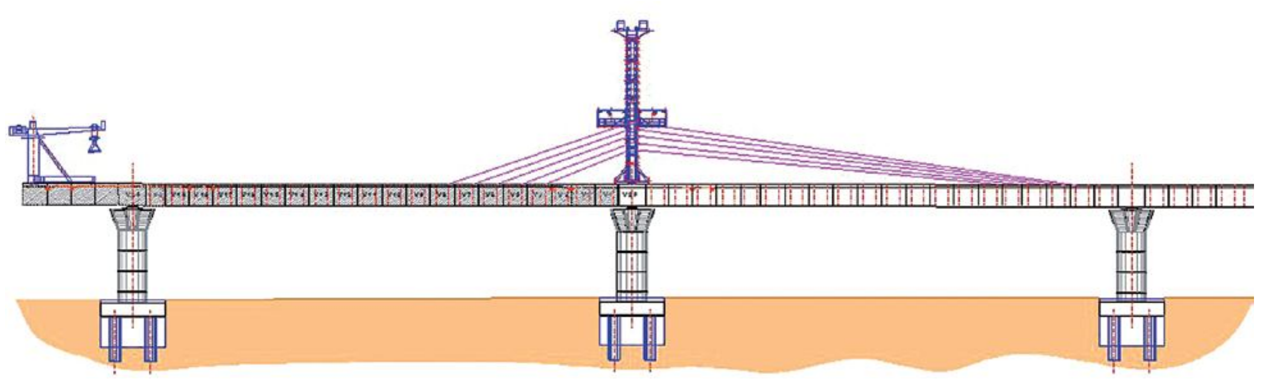


Figure 17 : Mini-fléau sur la nouvelle travée à construire et démontage du haubanage sur la travée précédente en vue de la mise en place du mât de haubanage sur la pile suivante - source : VINCI

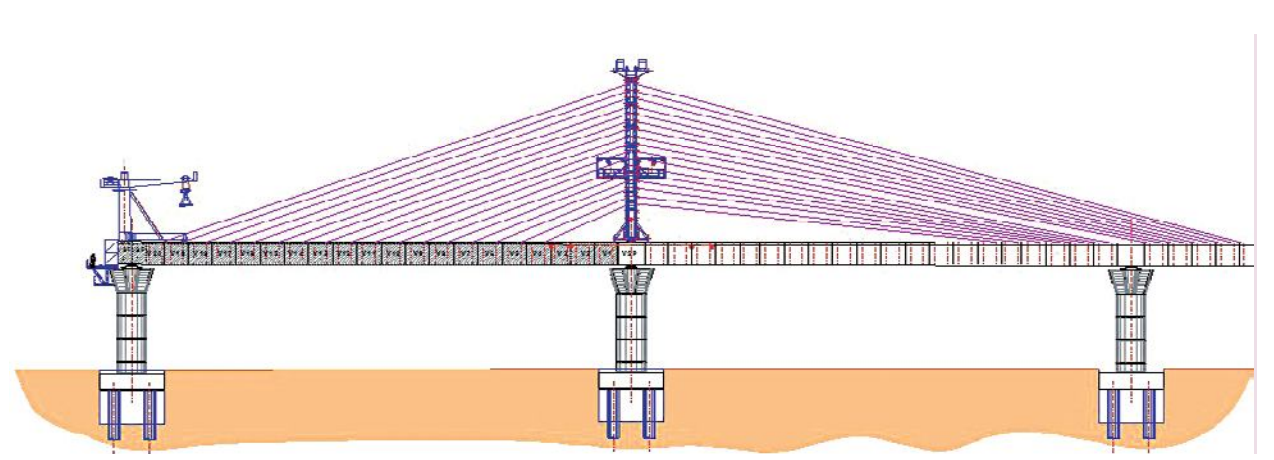
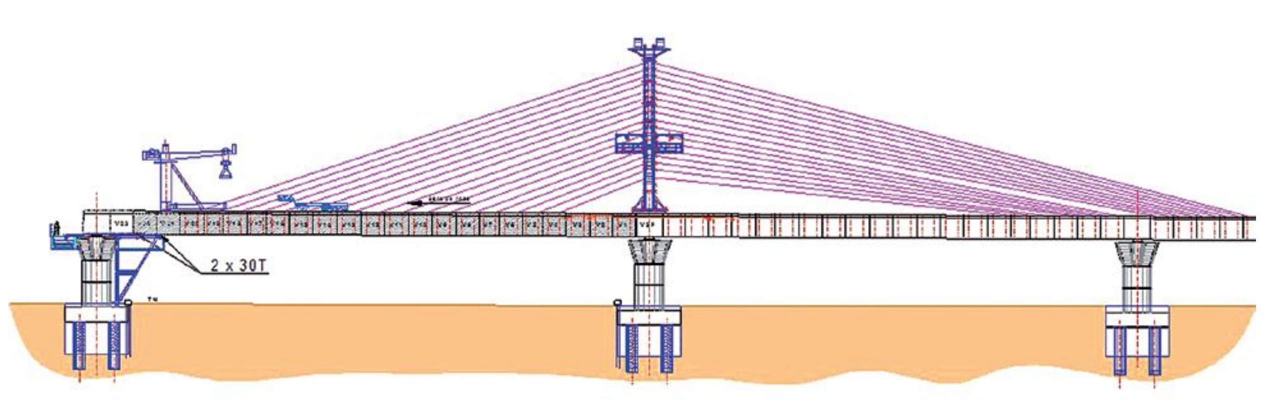


Figure 18 : Accostage de la pile suivante - Schéma procédure VINCI



Figures 19 : Réalisation particulière des grandes travées, schéma de procédure pour l'emploi des mini-cintres - Source : VINCI

Les deuxième et troisième voussoirs étaient maintenus chacun par une paire de câbles de fléau 9T15S qui s'ancraient sur les voussoirs de la travée précédente, symétriques par rapport au VSP.

Chaque voussoir était pris en charge par la potence disposée sur le dernier voussoir posé, présenté en vis-à-vis du dernier voussoir en place, encollé à l'aide d'une colle époxydique puis brêlé au voussoir précedent par des barres de précontrainte, passant dans des nervures ancrées sur les âmes à l'intérieur du caisson.

L'exécution de ce mini-fléau permettait de dégager l'espace nécessaire à la mise en place du mât de haubanage au droit de la pile.

Un haubanage provisoire était alors mis en place afin de maintenir chaque voussoir suivant en porte-à-faux, un hauban étant ancré à l'arrière, sur les travées précédentes, en vue d'assurer l'équilibre. La tension dans les haubans était ajustée de manière à ce que sa composante verticale équilibre exactement le poids du voussoir en cours de pose, ce qui permettait de compenser la flèche due à la pose de chaque nouveau voussoir.

Ce réglage permettait ainsi d'accoster sur la pile suivante à une hauteur proche du niveau définitif. Les deux demi-voussoirs sur pile étaient ensuite brêlés et appuyés sur des vérins, permettant d'assurer un réglage fin et une pose du tablier sur appui définitif.

Une fois qu'une nouvelle travée était entièrement posée, il fallait procéder à sa mise en précontrainte. Enfin, au fur et à mesure de la construction du mini-fléau de la travée suivante, il était possible de démonter le haubanage provisoire de la travée précédente.

Le mât de haubanage possèdait 18 positions pour la mise en place d'autant de paires de haubans. La construction des travées courantes de 58,70 m de portée, comportant 20 voussoirs courants et déviateurs, a nécessité d'utiliser 17 positions de haubanage, soit la quasi-totalité de la capacité du mât.

Pour la réalisation des plus grandes travées, de 66,50 m de portée, comportant 23 voussoirs courants et déviateurs, il a fallu mettre en place des mini-cintres supplémentaires en about de travées, pour y appuyer les trois voussoirs surnuméraires. Ces cintres en console étaient brêlés aux piles et appuyés sur les semelles de fondations.

En variante à la construction de la première travée sur cintre, il est envisageable, sur le principe, de réaliser une travée d'équilibrage à l'arrière de la culée de départ. Cette travée sert alors d'ancrage arrière pour les haubans de retenue et le mât de haubanage peut être positionné sur la culée afin de permettre la construction de la première travée. Avec cette méthode alternative, qui n'a pas été retenue dans le cas du viaduc de Compiègne, les voussoirs ayant servi à constituer la travée arrière d'équilibrage sont ultérieurement disposés dans une travée définitive de l'ouvrage.

Enseignements à tirer concernant la construction à l'avancement, avec préfabrication des voussoirs

Les avantages de la technique de construction à l'avancement retenue (avec des voussoirs préfabriqués) sont substantiels. Elle ne nécessite en effet pas d'emprise au sol, un accès continu étant assuré par la portion de tablier préalablement construite. Cette méthode s'adapte de surcroît à toutes contraintes géométriques de tracé en plan, de profil en long ou de dévers.

Par ailleurs, la flexion des piles est limitée en phase de construction et le cycle de pose est très rapide. Une travée de 22 ou 25 voussoirs (selon les portées, en incluant le VSP) peut être posée en une semaine. Le tablier peut en outre être construit directement sur les appareils d'appui définitifs car les rotations générées par les phases de construction sont très limitées, grâce au haubanage qui assure un « étaiement par le dessus ».

En revanche, cette méthode présente également quelques inconvénients, provenant du fait que :

• la portée franchissable est limitée (environ 60 m) par la capacité du mât de haubanage ;

• les piles (et donc les appareils d'appui et les fondations) sont fortement chargées verticalement en phase de construction, le poids de quasiment deux travées descendant sur la pile au droit de laquelle se situe le mât de haubanage ;

• il y a nécessité de réaliser la première travée sur cintre, ce qui constitue une étape particulière au sein d'un phasage par ailleurs très optimisé.

Principaux intervenants

Maître d'ouvrage	DRE Picardie / Service Maîtrise d'Ouvrage
Maître d'œuvre	DDE de l'Oise / Service des Grandes Infrastructures (phases EPOANC, POANC, DCE et AO), puis DIR Nord – Services d'Ingénierie Routière de Lille et de Reims
Entreprise principale	Groupement Campenon Bernard TP / Chantiers Modernes / GTM GCS
Maîtrise d'œuvre études	• CETE Nord-Picardie : - Division Ouvrages d'Art, Département Infrastructures - LRPC Lille pour les études géotechniques (assisté du LREP pour les travaux d'injection) - SETRA : Division des Grands Ouvrages et de l'Innovation, Centre Technique Ouvrages d'Art - Architecte : Pierre LOYER (cabinet AEI)
Études d'exécution	• Bureau d'études interne de Campenon Bernard TP (fondations et appuis) • ARCADIS (tablier)
Contrôles d'exécution	• CETE Nord-Picardie : - Division Ouvrages d'Art (études fondations et appuis, coordination globale) - LRPC Lille et LRPC St Quentin pour les contrôles sur chantier (bétons, précontrainte,…) • SETRA : Division des Grands Ouvrages et de l'Innovation, Centre Technique Ouvrages d'Art (tablier)

Principales quantités

Pieux	150 pieux (diamètres 1 400 et 1 600 mm), soit 2 580 ml, 60 kg/m^3
Béton	Près de 30 000 m^3 de béton (environ 50 % pour le tablier et 50 % pour les appuis-fondations)
Aciers de précontrainte	• 300 t de précontrainte intérieure (21 kg/m^3) • 450 t de précontrainte extérieure (27 kg/m^3)
Armatures passives	4 610 t d'aciers HA
Semelles	100 kg/m^3
Fûts de piles	35 kg/m^3
Chevêtres de piles	90 kg/m^3
Tablier	Ratio moyen 208 kg/m^3 : • voussoirs courants : 200 kg/m^3 • voussoirs déviateurs : 250 kg/m^3 • voussoirs sur piles : 265 kg/m^3 • voussoirs sur culées et piles-joints : 275 kg/m^3
Palplanches	1 380 T (batardeaux des piles)
Appareils d'appui	Une centaine : 54 AA à pot et 48 AA en caoutchouc fretté

Convois exceptionnels et efforts horizontaux

Jean-Christophe Carlès, Division Ouvrages d'Art / CETE Méditerranée

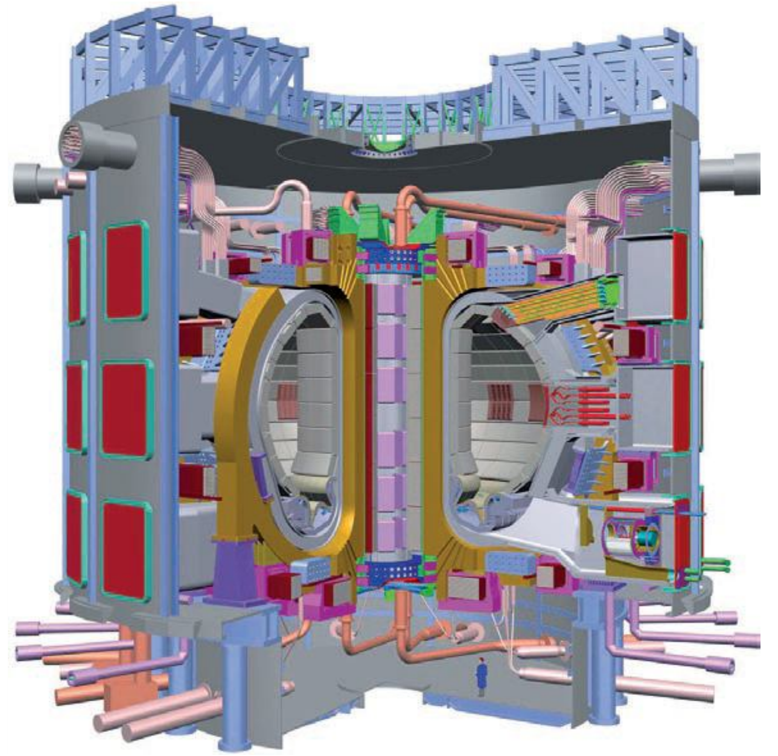


Figure 1 : ITER - Source CEA

Il est habituel, dans la vérification de portance d'un ouvrage sous le passage d'un convoi exceptionnel, de ne pas tenir compte des efforts horizontaux que le convoi est susceptible d'engendrer, dès lors que ce dernier roule au pas et ne doit ni freiner ni accélérer au droit du pont.

Cette pratique est mise en défaut dans le cas de convois particulièrement lourds car les efforts moteurs nécessaires à la progression du convoi à vitesse constante ne sont plus négligeables. L'effort global s'avère bien sur d'autant plus important que la pente longitudinale est forte. Ces efforts peuvent ainsi s'avérer bien supérieurs aux efforts de freinage du règlement français 61 titre II (30 tonnes à pondérer par 1,2 à l'état limite de service soit 36 tonnes), voire, et bien qu'ils aient été augmentés par rapport au règlement français, aux efforts définis dans l'annexe nationale de l'Eurocode 1 (valeur plafond de 500 kN sauf en cas de possibilité de circulation du convoi militaire STANAG auquel cas cette valeur maximale est portée à 900 kN). Ces efforts peuvent ainsi s'avérer dimensionnants pour les appareils d'appuis, les joints de chaussée, les piles, les garde-grèves, les fondations...

Ces situations particulières ont été rencontrées lors des études d'ouvrages d'art menées dans le cadre de l'aménagement de l'itinéraire qui doit permettre d'acheminer les colis composant le projet ITER depuis la mer, ou plus précisément l'étang de Berre, jusqu'à leur site d'assemblage, le site de Cadarache du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) dans le département des Bouches du Rhône.

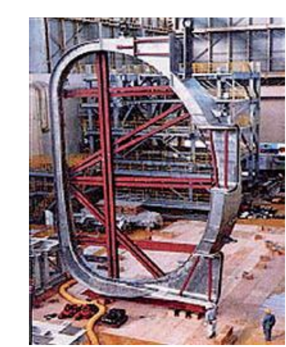


Figure 2 : Un composant d'ITER - Source : CEA

Le projet ITER et l'aménagement de l'itinéraire d'acheminement des colis

La construction de la machine ITER (machine de recherche en fusion contrôlée) nécessite l'assemblage de composants, fabriqués pour partie dans les pays partenaires du projet, qui seront transportés par voie maritime jusqu'au territoire français. Cadarache étant situé à 70 km environ du bord de mer, un itinéraire empruntant majoritairement le réseau routier existant a été aménagé pour permettre l'acheminement des colis dont les poids s'échelonnent entre 190 et 600 tonnes. Au total, environ 300 éléments seront à acheminer en convois exceptionnels jusqu'au site ITER durant au moins 5 ans (Figure 3).

Le transporteur en charge de l'acheminement des colis n'est pas encore désigné; pour autant, il a été nécessaire de définir des convois type «enveloppe» pour établir les diagnostics de portances des ouvrages franchis et définir les projets d'aménagement. A titre d'illustration, un des convois type parmi les plus lourds et les plus agressifs est représenté sur la figure 4. Pour le convoi le plus lourd, la charge totale atteint 880 tonnes et conduit à une pression au sol de 4,50 t/m2 après répartition sur les 26 lignes d'essieux de 33,8 tonnes chacun. Cette charge au sol atteint même 4,71 tonnes/m^2 pour un convoi légèrement moins lourd (700 tonnes) mais plus court et plus agressif.

L'itinéraire comporte 26 ouvrages de portée supérieure à 5m qui ont été analysés. Compte tenu de la spécifité et de l'importance des charges, très peu d'entre eux se sont avérés capables de supporter le passage des convois, mis à part quelques ponts en maçonneries de faible ouverture et en plein cintre. Suivant les cas, les sollicitations se sont révélées être jusqu'à 2,5 fois supérieures à celles engendrées par les charges réglementaires. Il a donc été nécessaire soit :

• de renforcer les ouvrages existants. En pratique peu l'ont été, compte tenu à la fois de l'importance du dépassement des sollicitations mais aussi du manque de données disponibles pour étudier les renforcements (peu de dossiers d'ouvrages disponibles étaient complets),

• de remplacer les ouvrages existants (démolition et reconstruction en place),

• de construire des ouvrages provisoires uniquement dédiés aux passages des convois en parallèle des ouvrages existants,

• de construire des ouvrages neufs définitifs en parallèle des ouvrages existants, destinés à la fois à supporter le passage des convois mais aussi le trafic courant (l'ouvrage existant est délaissé ou démoli).

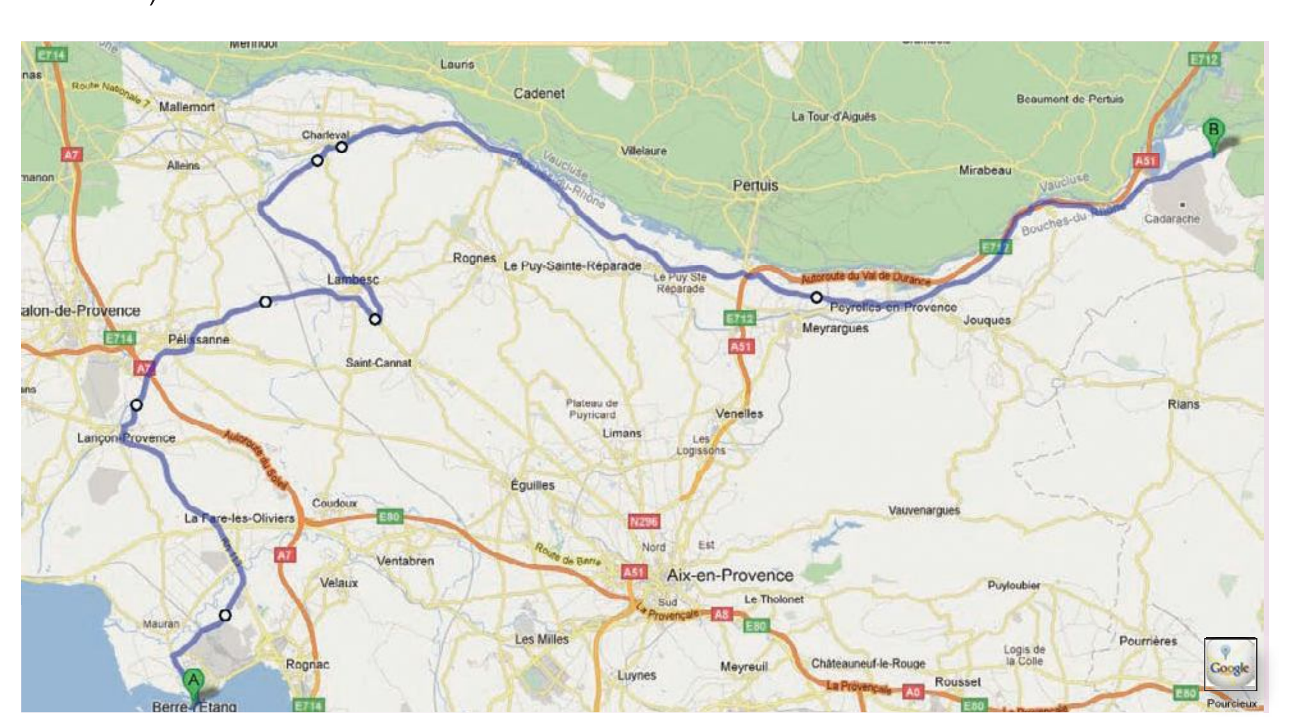


Figure 3 : Itinéraire ITER - Source CETE Méditérranée / Google Map®

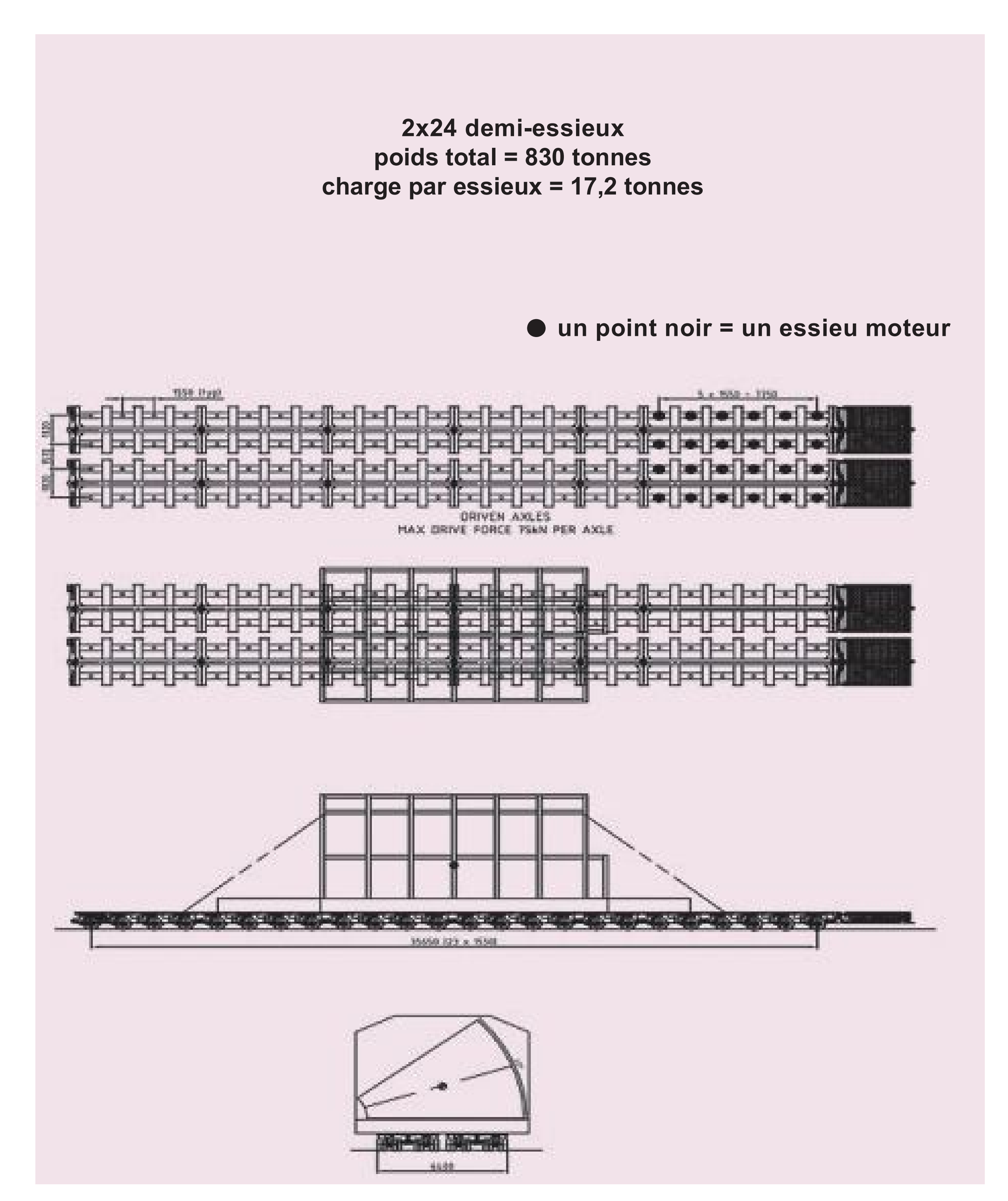


Figure 4 : Exemple de convoi - Source Mammoet

Les efforts horizontaux engendrés par la motricité des convois

Dans le cas des convois ITER, les efforts horizontaux ont été déterminés par un transporteur associé par le CEA aux études. Les remorques autopropulsées susceptibles d'acheminer les colis comportent un système de transmission hydraulique. Ces remorques disposent d'essieux moteurs et d'essieux freinés (figure 4). Les efforts engendrés par la motricité dépendent de la pente et du poids total roulant auquel ils sont proportionnels. Ils se répartissent de manière égale entre tous les essieux moteurs des convois.

Les efforts maximaux exercés sur les ouvrages de l'itinéraire ITER ont été calculés suivant la pente longitudinale des ouvrages, le type de convois, la longueur des tabliers et le nombre d'essieux moteurs qu'il était physiquement possible d'y placer. Leurs valeurs se sont échelonnées entre 10 et 100 tonnes, soit au maximum près de 3 fois supérieurs aux efforts de freinage du règlement français. La valeur de 36 tonnes était atteinte pour des convois de 350 tonnes qui seraient amenés à circuler sur une route pentée à 6%.

Par rapport aux seules charges verticales la prise en compte de ces efforts horizontaux a conduit à :

- épaissir les piédroits d'un PIPO,
- augmenter le souffle des joints de chaussée de trois ouvrages,
- revoir le dimensionnement des appareils d'appuis pour six ouvrages,
- revoir le dimensionnement des fondations (augmentation de la dimension de semelles, du nombre et/ou du diamètre des pieux) pour sept ouvrages.

Ces sollicitations se sont avérées d'autant plus agressives pour les fondations que les essieux moteurs pour certains des convois testés, sont concentrés sous les véhicules tracteurs ou à l'avant des remorques autopropulsées (figure 4). Dès lors, si la remorque avec le colis transporté n'a pas encore atteint le tablier, la totalité des efforts horizontaux peut s'appliquer à l'ouvrage alors même que la charge verticale concomitante (favorable en flexion composée pour la vérification des pieux ou pour la vérification des critères de stabilité des semelles superficielles) reste faible.

De l'éventualité d'un freinage d'urgence

Lors d'un freinage d'urgence, toutes les lignes d'essieux freinés sont actionnées simultanément au maximun de leur capacité. Suivant les configurations, ces efforts sont de plusieurs centaines de tonnes. Ils valent plus de 200 tonnes pour une pente nulle.

Devant l'importance de ces valeurs, il a été décidé de ne pas considérer cette action et d'imposer au futur transporteur de franchir les ouvrages à vitesse très réduite (1 à 2 km/h maxi). Le recours au freinage d'urgence a été interdit, mais en cas de nécessité, les conducteurs sont tenus de couper l'alimentation hydraulique afin d'arrêter l'avancement des remorques, ce qui permet un freinage très progressif.

Conclusion

Dans les cas usuels, les efforts moteurs des convois exceptionnels qui circulent au pas restent inférieurs aux efforts de freinage pris en compte dans le fascicule 61 titre II et l'EC1. Dans le cas des remorques autopropulsées étudiées pour l'acheminement des colis ITER, ces seuils étaient fréquemment dépassés. Il convient donc de rester vigilant pour des charges très lourdes et/ou des pentes très fortes et, par ailleurs, de sensibiliser les transporteurs sur la nécessité de ne pas exercer de freinage brutal lors de leur passage sur un ouvrage.

Principaux intervenants

Maîtres d'ouvrages	Commisariat à l'Energie Atomique de Cadarache (CEA) pour les études préalables de recherche d'itinéraire et les études de caractérisation de portance des ouvrage existants. Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Provence Alpes Côte d'Azur (DREAL PACA) pour les études et les travaux d'aménagement de l'itinéraire.
Assistant des Maîtres d'ouvrages pour toute l'opération	CETE Méditerranée
Études préalables de mode d'acheminement et de recherche d'itinéraires	CETE Méditerranée
Étude de caractérisation des ouvrages existants	Groupement GETEC/SEDOA/Sud Études/LERM
Maître d'œuvre général études (post DUP) et travaux	EGIS
Entreprises en charge des travaux d'ouvrages d'art	RAZEL / HEAVEN CLIMBER / ACCMA / BOTTE FONDATIONS / FIGUIERE - Eiffage TP/Appia 13/Eiffel/BEC - DV construction / Gagne / Simeco - Chantiers Modernes / Matiere/GTM GCS/GTM Terrassements/Franki fondation - DV Construction / SCREG
Contrôles extérieurs des travaux	CETE Méditerranée

Comment calculer des sections conformément aux Eurocodes avec un logiciel adapté ?

Renaud Léglise, Angel-Luis Millan

Les Eurocodes, c'est bien… avec CDS, c'est aussi bien !

L'application des Eurocodes par les acteurs du génie civil imposait d'adapter les logiciels du Sétra pour les rendre compatibles avec ces normes européennes de calcul.

Parmi ces logiciels, CDS® constitue un programme de calcul des sections puissant et très général qui offre l'ensemble des outils nécessaires à une définition des lois de comportement des matériaux strictement conforme aux prescriptions de l'Eurocode 2 (EC2).

L'objectif de cet article consiste d'une part à expliquer aux utilisateurs du logiciel CDS® en quoi celui-ci, conçu initialement pour le BAEL et le BPEL, est déjà parfaitement compatible avec un calcul de sections aux Eurocodes et, d'autre part, à donner les clés d'un paramétrage correct des lois de comportement des matériaux pour effectuer un calcul conforme aux Eurocodes.

L'essentiel est dans les lois de comportement

Depuis deux ans, les outils permettant de créer les lois de comportement des matériaux de l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1) aux ELU ont été introduits dans CDS®, en complément des lois relatives aux règlements français antérieurs (BAEL et BPEL). Ces outils permettent en particulier de créer les lois - nouvelles - introduites par l'EC2, que sont les lois à l'ELU bilinéaires avec raffermissement pour les aciers passifs ou de précontrainte.

Ainsi, lorsque l'on veut effectuer un calcul de sections avec CDS®, il est primordial de paramétrer correctement les lois de comportement des matériaux (béton, acier passif et acier de précontrainte) dans le strict respect des lois imposées par le règlement considéré. Un calcul selon les Eurocodes n'échappe évidemment pas à cette exigence générale et c'est pourquoi nous nous proposons maintenant de passer en revue les lois de comportement correspondantes et d'indiquer leur paramétrage conforme aux Eurocodes.

Paramétrage (assisté) de CDS pour un calcul de sections aux Eurocodes

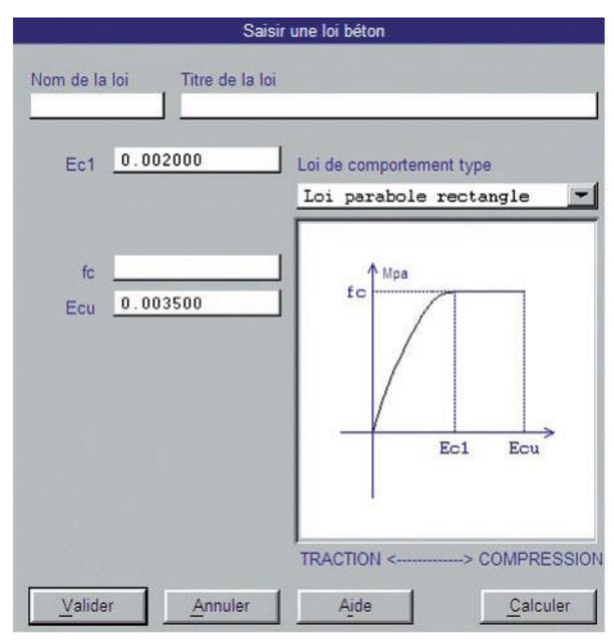


Figure 2 : panneau standard de saisie d'une loi béton parabole-rectangle

De manière générale, lorsque l'on veut créer une loi dans CDS, par exemple par les menus « Lois → Créer → Loi béton », il apparaît une boîte de saisie dans laquelle il est possible de choisir un type de loi (par exemple parabole–rectangle) dans une liste déroulante pour aboutir à une loi « standard » comme celle de la figure 2.

Cette loi est définie par des paramètres dont la notation n'est pas spécifique à un règlement particulier (par exemple, ici, $\{E_{c1}, E_{cu}, f_c\}$, et dont certains champs sont souvent pré-remplis avec des valeurs « usuelles » (sans intérêt dans le cadre de l'EC2).

On peut compléter ou modifier la loi de deux façons :

• champ par champ, en tapant les valeurs voulues dans les cases,

• globalement, en appuyant sur le bouton « CALCULER », pour paramétrer la loi suivant des critères particuliers.

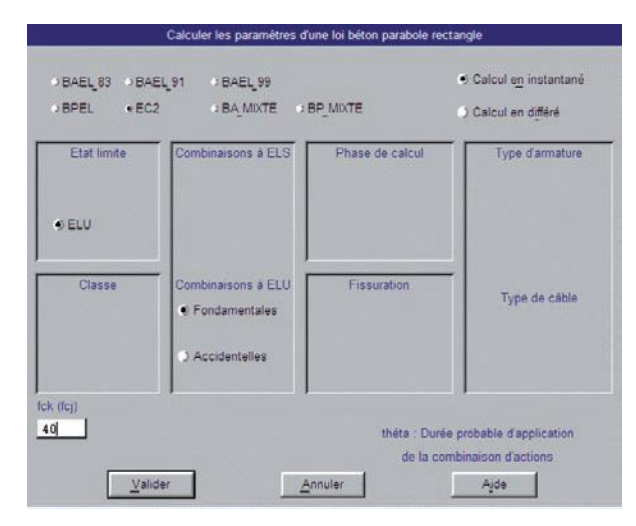


Figure 3 : panneau de personnalisation d'une loi béton parabole-rectangle (exemple de « sous-panneau EC2 »)

Dans le deuxième cas, il apparaît un panneau (figure 3) qui permet de choisir un type de règlement (ici, nous choisirons bien sûr systématiquement EC2) et des paramètres de personnalisation (ici, type de combinaisons ELU et f_{ck}). En appuyant sur le bouton « VALIDER », on revient sur le panneau de la figure 2, où les champs ont été calculés et remplis en fonction des choix effectués.

Par la suite, pour éviter les lourdeurs, nous ne reproduirons plus les panneaux du type de la figure 3. On y fera référence si nécessaire par la dénomination « sous-panneau EC2 ».

Le recours à cette fonction « CALCULER », très pratique, du logiciel est vivement recommandé, avec les quelques précisions suivantes :

• elle ne traite pas les lois de comportement ELS mais ceci ne constitue pas une lacune ou un handicap dans la mesure où les paramètres à déterminer pour ces lois sont à la fois peu nombreux et simples ;

• comme nous le verrons par la suite également, les valeurs de déformation limite ultime des aciers sont (pour l'instant) à adapter manuellement pour certaines lois.

Moyennant ces avertissements, le recours à cette fonctionnalité de CDS s'avère très efficace et facilite beaucoup la tâche de l'utilisateur car, avec un nombre de données d'entrée très restreint, elle lui fait économiser beaucoup de calculs manuels fastidieux.

Pour le matériel béton

Calcul ELU

Loi de comportement parabole-rectangle

Le sous-panneau EC2 de CDS demande d'entrer fck et le type de combinaisons ELU (fondamentales ou accidentelles). CDS calcule alors les valeur de ε_{c2} et ε_{cu2} (notées E_{c1} et E_{cu} dans CDS), qui valent :

$$\begin{cases} \varepsilon_{c2} = 0.002 & \text{si} \quad f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \varepsilon_{c2} = 0.002 + 8.5.10^{-5}\left(f_{ck} - 50\right)^{0.53} & \text{si} \quad f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{cu2} = 0.0035 & \text{si} \quad f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \varepsilon_{cu2} = 0.0026 + 0.035\left(\dfrac{90 - f_{ck}}{100}\right)^{4} & \text{si} \quad f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \end{cases}$$

Pour la contrainte limite en compression du béton f_{cd} (notée fc dans CDS), qui ne dépend plus du coefficient de durée d'application de la charge (d'où il résulte que les boutons « calcul en instantané » et « calcul en différé » que l'on peut voir figure 3 sont en fait sans effet), CDS applique :

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_b}$$

avec $\alpha_{cc} = 1.00$ et $\gamma_b = 1.50$ ou $\gamma_b = 1.20$ selon que l'on a choisi une loi vis-à-vis des combinaisons fondamentales ou vis-à-vis des combinaisons accidentelles.

Par ailleurs, la loi de comportement parabole-rectangle implémentée de manière automatique dans CDS ne prévoit « que » la loi de degré 2, qui est cependant la plus fréquente, c'est-à-dire avec n = 2 dans l'expression :

$$\sigma_c = f_{cd}\left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}}\right)^n\right] \quad \left(0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{c2}\right)$$

pour fck ≤ 50 Mpa

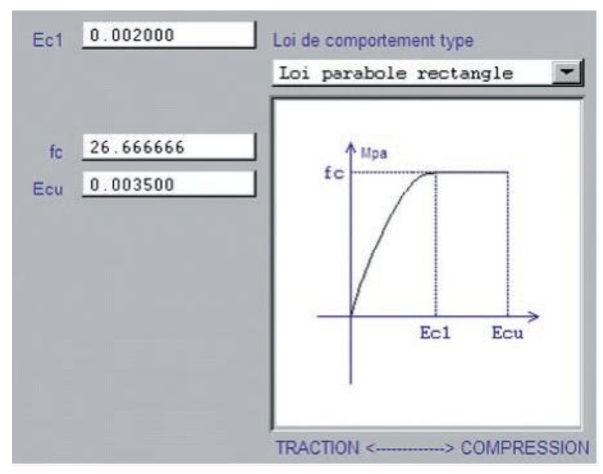


Figure 4a : Panneau CDS pour la loi parabole rectangle

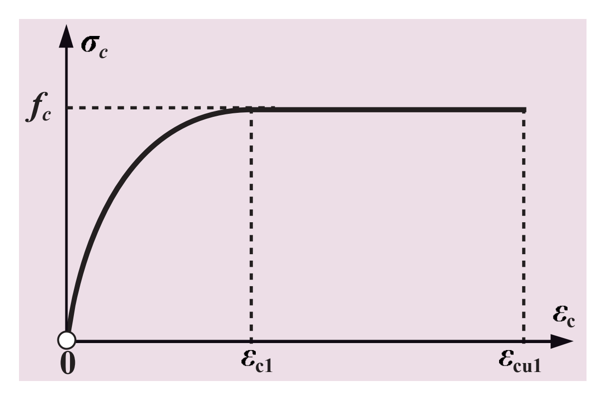


Figure 4b : loi de comportement béton ELU de type parabole-rectangle

Or, lorsque $f_{ck} > 50\ \mathrm{MPa}$, l'EC2 prévoit $n < 2$, selon l'expression :

$$n = 1.4 + 23.4\left(\frac{90 - f_{ck}}{100}\right)^4$$

Ainsi, dans le cas d'un BHP, il conviendra de créer manuellement la loi en entrant point par point les couples de valeurs $\{\varepsilon, \sigma = f(\varepsilon)\}$, ce qui ne pose pas de difficulté majeure car CDS comporte un menu de création d'une loi quelconque (« Lois → Créer →Loi quelconque »), qui a été prévu à cet effet et qui représente un des atouts importants du logiciel tout en participant à lui conférer un domaine d'emploi très général.

On notera que l'on a adopté l'option « CONTRAINTE NULLE » pour la définition de la loi avant le premier point et après le dernier point, afin d'être sûr qu'aucune contrainte ne sera prise en compte dans le béton en traction ou comprimé au-delà de sa déformation limite.

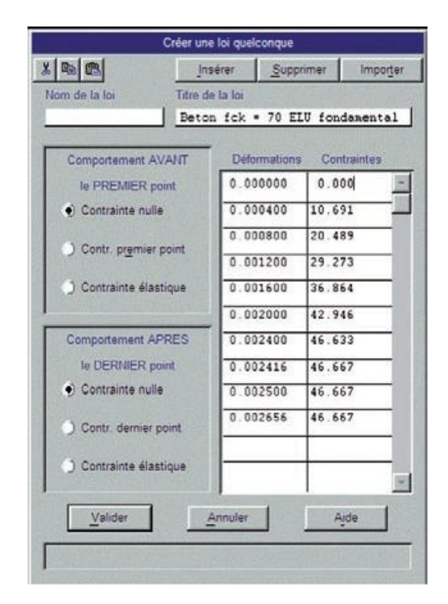


Figure 5 : Menu de création d'une loi de comportement quelconque (exemple d'un béton fck = 70 MPa)

Loi de comportement de type Sargin

Comme pour la loi parabole-rectangle, le sous-panneau EC2 demande d'entrer f_{ck} et le type de combinaisons ELU (fondamentales ou accidentelles), puis procède au calcul de l'ensemble des paramètres de la loi suivant les prescriptions de l'EC2, rappelées ci-après. Les notations de CDS restent ses notations « standard » (E_{c1}, E_{cu} et f_c en lieu et place de ε_{c1}, ε_{cu1} et f_{cd} pour l'EC2)

La loi de l'EC2 s'écrit :

$$\sigma_c = f_{cd}\frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \qquad \eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$$

Avec :

$$\varepsilon_{c1} = \min\left(0.0007 f_{cm}^{\ 0.31}, 0.0028\right)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{cu1} = 0.0035 & \text{si} \quad f_{ck} \leq 50\ \mathrm{MPa} \\ \varepsilon_{cu1} = 0.0028 + 0.0027\left(\dfrac{90 - f_{ck}}{100}\right)^4 & \text{si} \quad f_{ck} \geq 50\ \mathrm{MPa} \end{cases}$$

$$k = 1.05 E_{cd}\frac{|\varepsilon_{c1}|}{f_{cd}}, \quad E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}}, \quad E_{cm} = 22000\left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3}, \quad \gamma_{CE} = 1.2, \quad f_{cm} = f_{ck} + 8$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc}\frac{f_{ck}}{\gamma_b} \quad \text{avec} \quad \alpha_{cc} = 1.00$$

Cette loi est entièrement déterminée par f_{ck} et par γ_b, qui est pris égal à 1.50 ou à 1.20 selon que l'on a choisi une loi vis-à-vis des combinaisons fondamentales ou vis-à-vis des combinaisons accidentelles.

Notons par ailleurs que la définition d'une loi de type Sargin à l'Eurocode ne nécessite pas le recours au coefficient k_p (k') qui existe pour une loi de Sargin au BPEL, et dont l'expression est reportée ci-dessous, pour mémoire :

$$\sigma_c = f_c \frac{k\eta + (k'-1)\eta^2}{1 + (k-2)\eta + k'\eta^2} \qquad \eta = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}}$$

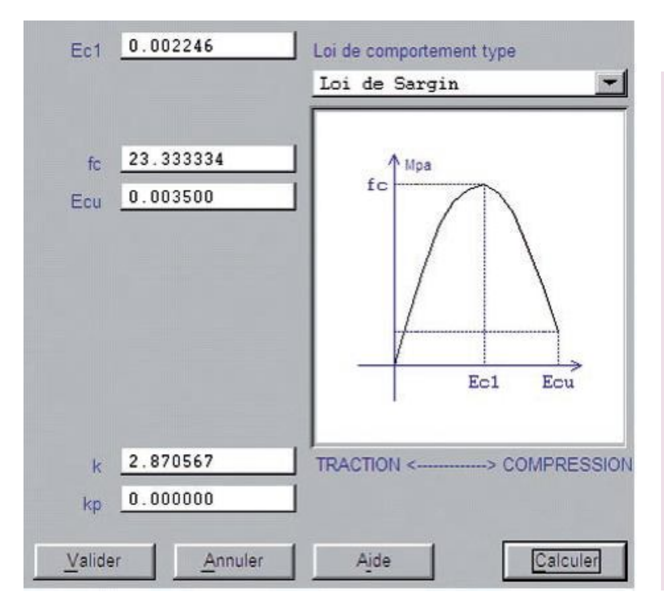


Figure 6a : Panneau CDS pour la loi de type Sargin

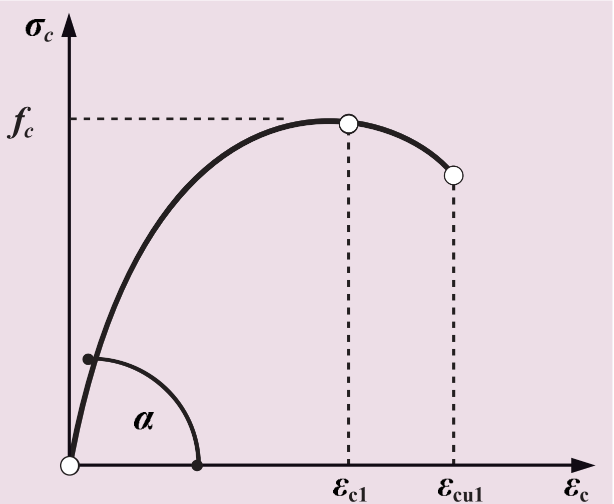


Figure 6b : Loi de comportement béton ELU de type Sargin

Loi de comportement bilinéaire (élasto–plastique)

Comme pour les autres lois, f_{ck} est entrée dans le sous-panneau EC2 et γ_b est pris égal à 1.50 ou à 1.20 suivant que l'on a choisi une loi vis-à-vis des combinaisons fondamentales ou accidentelles.

CDS calcule la valeur de ε_{cu3} (notée Ecu), qui vaut :

$$\begin{cases} \varepsilon_{cu3} = 0.0035 & \text{si} \quad f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \varepsilon_{cu3} = 0.0026 + 0.035\left(\dfrac{90 - f_{ck}}{100}\right)^4 & \text{si} \quad f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \end{cases}$$

ainsi que celle de f_{cd} (notée fc dans CDS) :

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_b}$$

Curieusement, le paramètre ε_{cu3} n'a pas été retenu pour définir complètement la loi. En fait, c'est le module du béton (noté E_b) qui donne le dernier paramètre. Ce module représente la pente de la portion linéaire de la courbe, et non la valeur du module d'élasticité instantané du béton E_{cm} ou du module différé tenant compte du fluage.

De ce fait, la fonction CALCULER détermine d'abord ε_{cu3} suivant l'EC2 :

$$\begin{cases} \varepsilon_{c3} = 0.00175 & \text{si} \quad f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \varepsilon_{c3} = 0.00175 + 5.5.10^{-4}\left(\dfrac{f_{ck} - 50}{40}\right) & \text{si} \quad f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \end{cases}$$

puis renseigne le module

$$E_b = \frac{f_{cd}}{\varepsilon_{c3}}$$

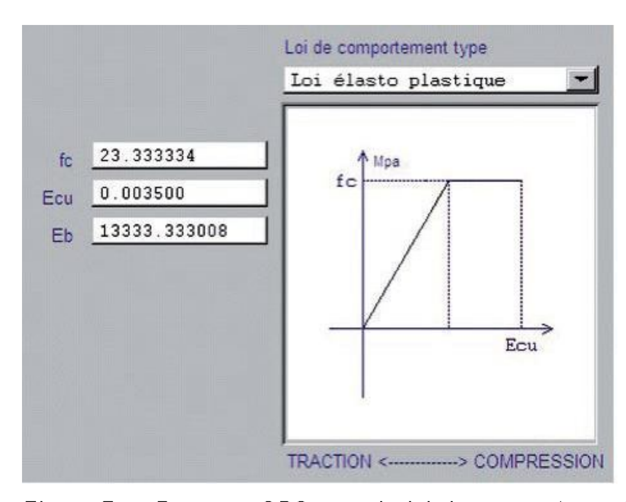


Figure 7a : Panneau CDS pour la loi du comportement bilinéaire (élasto-plastique)

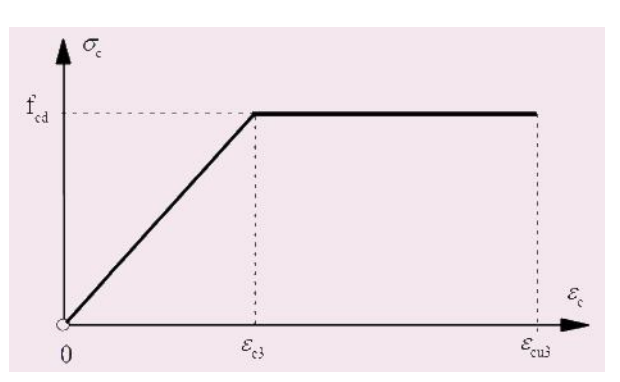


Figure 7b : Loi de comportement du béton ELU de type élasto-plastique

f_{ck}	f_{cd}	E_{cm} (MPa)	$_{c3}$ (en ‰)	**Eb = $f_{cd}/_{c3}$**	E_b/E_{cm}
25	16.7	31 476	1.75	**9 524**	0.30
30	20.0	32 837	1.75	**11 429**	0.35
35	23.3	34 077	1.75	**13 333**	3.39
40	26.7	35 220	1.75	**15 238**	0.43
45	30.0	36 283	1.75	**17 143**	0.47
50	33.3	37 278	1.75	**19 048**	0.51
55	36.7	38 214	1.82	**20 160**	0.53
60	40.0	39 100	1.89	**21 192**	0.54
70	46.7	40 743	2.03	**23 045**	0.57
80	53.3	42 244	2.16	**24 663**	0.58

Figure 8 : Valeurs du paramètre E_b en fonction de f_{ck} (à l'ELU fondamental)

À titre indicatif, le tableau ci-contre indique la valeur (en MPa) du module E_b, qui est renseignée par la fonction CALCULER en fonction de f_{ck}. dans l'hypothèse de combinaisons fondamentales.

Calcul ELS

Loi de comportement linéaire

A l'ELS, pour le matériau béton, il convient de créer une loi ELS instantanée avec un module du béton égal au module instantané $E_{b,i} = E_{cm}$ et une loi ELS différée avec un module du béton égal au module différé, soit :

$$E_{b,d} = \frac{E_{cm}}{1+\varphi(\infty,t_0)}$$

Ceci requiert de la part de l'utilisateur un calcul préalable de la valeur de la fonction $\varphi(\infty,t_0)$ selon l'annexe B de l'Eurocode 2.

Les valeurs des modules instantané et différé du béton seront alors utilisées par CDS pour calculer les valeurs des coefficients d'équivalence *n* entre le béton et les aciers passifs :

$$n_{inst} = \frac{E_s}{E_{cm}} \qquad n_{diff} = \frac{E_s}{E_{cm}}\left(1+\varphi(\infty,t_o)\right)$$

et entre le béton et les aciers de précontrainte (en remplaçant Es par Ep). Ces coefficients d'équivalence servent à la détermination des caractéristiques mécaniques des sections homogènes, utilisées pour les contraintes induites par les charges variables (comme c'était le cas dans le BPEL). La valeur du coefficient d'équivalence à court terme est également utile au calcul de la déformation des armatures de précontrainte qui accompagne le retour à l'état zéro correspondant à l'état de contraintes et de déformations nulles dans le béton et les aciers passifs.

Signalons que, pour les calculs en béton armé, une alternative envisageable consiste à adopter, comme cela était proposé par le BAEL, un coefficient d'équivalence unique utilisé pour l'ensemble des efforts, sans dissocier les efforts court terme et long terme. Une manière de procéder est de fixer a priori la valeur relative de la part des charges variables par rapport aux charges totales, soit le rapport :

$$\xi = \frac{Q}{G+Q}$$

En considérant $\xi = 0.25$, ce qui correspond à $Q = 1/3 \cdot G$ (valeur réaliste dans un grand nombre de cas de figure), on peut alors définir un module du béton unique (« équivalent » pour l'ensemble des charges) en écrivant :

$$E_b(\infty) = \frac{1+\xi\varphi(\infty,t_0)}{1+\varphi(\infty,t_0)} E_{c,m}(\infty)$$

où $$\left(E_{c,eff}(\infty) = \frac{E_{cm}(\infty)}{1+\varphi(\infty,t_0)} \right)$$

est le module différé du béton, ce qui revient à :

$$E_b(\infty) = \xi E_{cm}(\infty) + (1-\xi) E_{c,eff}(\infty)$$

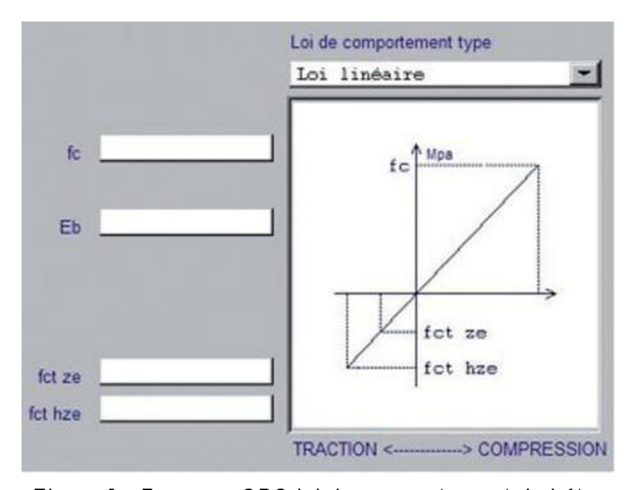


Figure 9 : Panneau CDS loi de comportement du béton ELS linéaire

Ce faisant, les lois de comportement ELS instantanée et différée sont alors définies de manière identique et l'approximation faite sur les résultats est tout à fait acceptable dans le cas général.

Concernant la contrainte limite en compression f_c du béton, plusieurs critères sont à considérer selon l'Eurocode 2 :

• limitation à 0.45 f_{ck} à l'ELS quasi-permanent, pour conserver la linéarité du fluage ;

• limitation à 0.60 f_{ck} à l'ELS caractéristique, pour éviter l'apparition de fissures longitudinales, pour les sections de béton soumises aux classes d'exposition XD, XF ou XS (il est cependant loisible de généraliser cette prescription à toutes les classes d'exposition) ;

• limitation à 0.60 f_{ck} pour éviter la compression excessive du béton soumis aux charges lors de l'application de la précontrainte ;

• par ailleurs, la limitation à 0.60 f_{ck} à l'ELS caractéristique permet de se dispenser de vérification à la fatigue du béton comprimé pour les ponts routiers.

Concernant la contrainte limite du béton en traction, deux valeurs sont à fournir : f_{tlim_hze} hors zone d'enrobage et f_{tlim_ze} en zone d'enrobage. Ces valeurs sont fonctions du critère de justification à respecter.

La zone d'enrobage est définie à partir de la donnée à fournir lors de la création d'un « câble type » (figure 10).

La zone d'enrobage des armatures de précontrainte au sens de l'EC2 est définie par une zone de 100 mm autour de la gaine ou de l'armature adhérente (dans le cas de la prétension), dans laquelle des critères de vérification particuliers sont à respecter. Elle ne doit pas être confondue avec l'enrobage de l'armature au sens de la durabilité.

Créer un câble type
Nom
Titre
Type d'armature
Intérieurs par post-tension
Intérieurs par adhérence
Extérieurs
Diamètre nominal (mm)
Aire (mm²)
D. d'encombrement (cm)
D. gaine (cm)
Zone d'enrobage (cm)
Valider
Annuler
Aide

Figure 10 : menu de création d'un câble-type. Définition de la zone d'enrobage des câbles

Par exemple, dans le cas où le critère de non décompression doit être respecté à l'ELS fréquent dans la zone d'enrobage du câble (cas des classes d'exposition XD ou XS), on indiquera $f_{tlim_ze} = 0$ et $f_{tlim_hze} = -k.f_{ctm}$ (avec k coefficient à déterminer selon le critère que l'on veut respecter). Il est à noter que le critère d'absence de décompression aux ELS fréquents (avec P_m) permet de se dispenser de la vérification à la fatigue des armatures de précontrainte et de béton armé…

En outre, en construction, l'article 113.3.2(103) de la NF EN 1992-2 permet une décompression à l'ELS quasi-permanent en zone d'enrobage, avec $\sigma_c \geq -f_{ctm}$. Ainsi, si l'on s'intéresse aux phases de construction, on pourra prendre dans un tel cas $f_{tlim_ze} = -f_{ctm}$ (pour autant que l'on n'ait pas à respecter une non décompression de joints dans le cas d'une structure comportant des voussoirs préfabriqués, par exemple…).

Par ailleurs, il convient de considérer $f_{tlim_hze} = -f_{ctm}$ à l'ELS caractéristique si l'on veut conserver des sections non fissurées.

Pour une section en béton armé, la notion de zone d'enrobage n'a pas de raison d'être et on confèrera alors à f_{tlim_ze} la même valeur que celle retenue pour f_{tlim_hze}.

Pour le matériau acier passif

Calcul ELU

Lois de comportement bilinéaires

Les notations de CDS pour définir ce type de loi sont :

- E_s,
- $E_u = \varepsilon_{ud}$,
- $f_{ser} = f_{yd}$,
- $f_t = \sigma_s(\varepsilon_{ud})$, qui ne possède pas de notation spécifique dans l'Eurocode 2.

Le sous-panneau EC2 demande d'entrer f_{yk}, le coefficient k, et le type de combinaisons ELU (fondamentales ou accidentelles).

L'Eurocode laisse l'utilisateur libre de choisir entre :

• La loi bilinéaire avec palier horizontal, auquel cas il faut, dans le sous-panneau EC2, donner une valeur unité au coefficient k. CDS calcule alors f_t et f_{ser} selon :

$$f_t = f_{ser} = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

En revanche, l'utilisateur doit dans ce cas conférer à $E_u = \varepsilon_{ud}$ une valeur très élevée, par exemple 1.0, car la déformation de l'acier passif n'est pas limitée.

• La loi bilinéaire avec raffermissement, auquel cas l'utilisateur doit indiquer dans le sous-panneau EC2 la valeur de k à considérer (fonction de la classe de ductilité de l'acier passif : 1.08 en classe B et comprise entre 1.15 et 1.35 en classe C). CDS calcule alors les valeurs de f_{ser} et f_t selon :

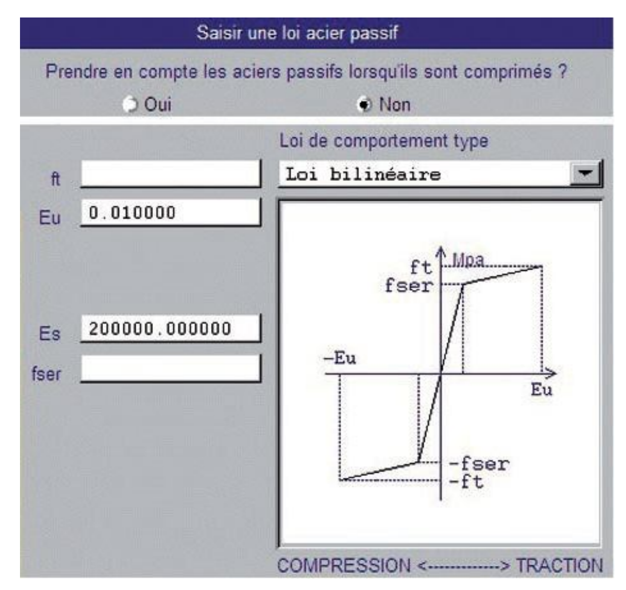
$$f_{ser} = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \qquad f_t = f_{yd} + (k-1) f_{yd} \frac{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_e}{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_e}$$

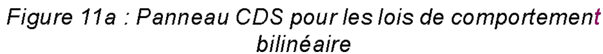
avec : $$\varepsilon_e = \frac{f_{yd}}{E_s}$$

Par ailleurs, la valeur retenue par CDS pour $E_u = {}_{ud} = 0.9\,\varepsilon_{uk}$ vaut toujours 4.5 %, ce qui est valable lorsque ε_{uk} = 5 % en classe de ductilité B mais doit être modifiée lorsque l'acier est de classe de ductilité C, auquel cas ε_{uk} = 7.5 % et donc ε_{ud} = 6.75 %.

Dans les deux cas, γ_s est pris égal à 1.15 ou à 1.00 suivant que l'on a choisi une loi vis-à-vis des combinaisons fondamentales ou accidentelles dans le sous-panneau EC2.

Notons qu'il est également possible (figure 11) d'indiquer par un bouton radio si l'on désire que les aciers comprimés soient pris en compte ou non dans les calculs.




Figure 11a : Panneau CDS pour les lois de comportement bilinéaire

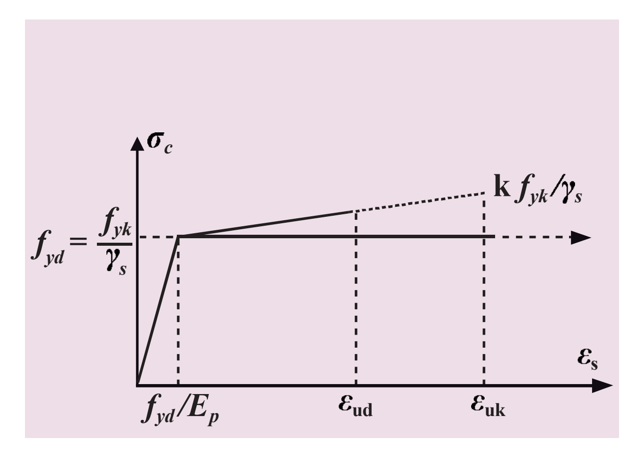


Figure 11b : Loi de comportement acier passif ELU de type bilinéaire (avec ou sans raffermissement)

Calcul ELS

Loi de comportement linéaire

Dans cette loi, il faut renseigner f_{tser}, à savoir la contrainte limite en traction de l'acier passif. Cette limite dépend du critère de vérification ELS que l'utilisateur se fixe :

- non plastification des armatures passives : f_{tser} = 0.8 f_{yk} à l'ELS caractéristique ;
- maîtrise de la fissuration : f_{tser} = 1000 w_k à l'ELS fréquent, avec w_k ouverture admissible des fissures à contrôler (soit en pratique : f_{tser} = 300 MPa en classe d'exposition XC et 200 MPa en classe d'exposition XD ou XS) ;
- f_{tser} = 300 MPa à l'ELS caractéristique (limitation forfaitaire pour dispense de calcul en fatigue des aciers passifs…).

Notons qu'il n'existe pas de sous-panneau EC2 pour ce type de loi, ce qui est logique, eut égard précisément au choix à faire par le projeteur, en fonction des considérations qui précèdent.

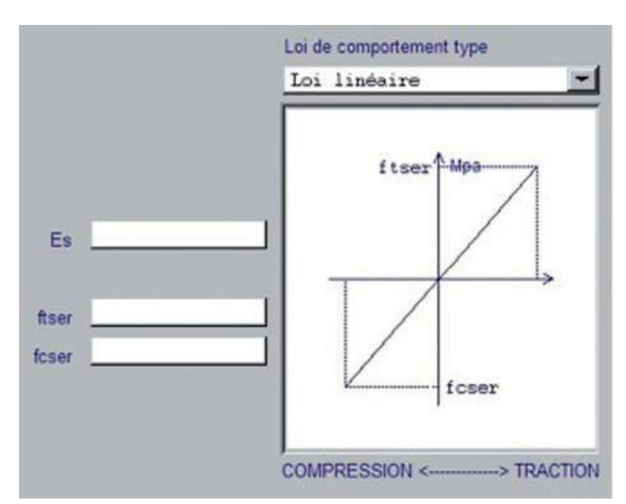


Figure 12 : Panneau CDS de la loi de comportement acier passif ELS linéaire

Pour le matériau acier de précontrainte (« câble »)

Calcul ELU

Lois de comportement bilinéaires

Ce type de loi, très proche de celles des aciers passifs, est caractérisée par :

- E_p,
- $E_u = \varepsilon_{ud}$,
- $f_{ser} = f_{pd}$,
- $f_p = \sigma_p(\varepsilon_{ud})$, qui ne possède pas de notation spécifique dans l'Eurocode 2.

Le sous-panneau EC2 de CDS demande d'entrer $f_{p0,1k}$, f_{pk}, et le type de combinaisons ELU (fondamentales ou accidentelles) et la nature de la précontrainte (barres, fils ou torons).

La zone de compression est, cette fois, systématiquement négligée.

L'Eurocode laisse l'utilisateur libre de choisir entre :

- La loi bilinéaire avec palier horizontal, auquel cas il faut, dans le sous-panneau EC2, entrer $f_{p0,1k} = f_{pk}$. CDS calcule alors f_p et f_{ser} selon :

$$f_p = f_{ser} = f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s}$$

En revanche, l'utilisateur doit dans ce cas conférer à $E_u = \varepsilon_{ud}$ une valeur très élevée, par exemple 1.0, car la déformation de l'acier de précontrainte n'est pas limitée.

- La loi bilinéaire avec raffermissement, auquel cas l'utilisateur doit indiquer dans le sous-panneau EC2 $f_{p0,1k}$ et f_{pk}. CDS calcule alors les valeurs de f_{ser} et f_p selon :

$$f_{ser} = f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s} \qquad f_p = f_{ser} + (k-1) f_{ser} \frac{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_e}{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_e}$$

avec : $$k = \frac{f_{pk}}{f_{p0,1k}} \text{ et } \varepsilon_e = \frac{f_{ser}}{E_p}$$

Par ailleurs, l'utilisateur doit modifier la valeur de $E_u = \varepsilon_{ud} = 0.9\ \varepsilon_{uk}$, en prenant $\varepsilon_{uk} = 0.9\ A_{gt}$, où A_{gt} est le pourcentage minimum d'allongement à la force maximale. Ce dernier doit être égal à 3.5 % d'après le projet de norme NF EN 10138-3, ce qui implique que $\varepsilon_{ud} = 0.9\ \varepsilon_{uk} = 0.9 * 09 * 3.5 =$ 2.835 % (ou, à défaut, $\varepsilon_{ud} = 0.02$).

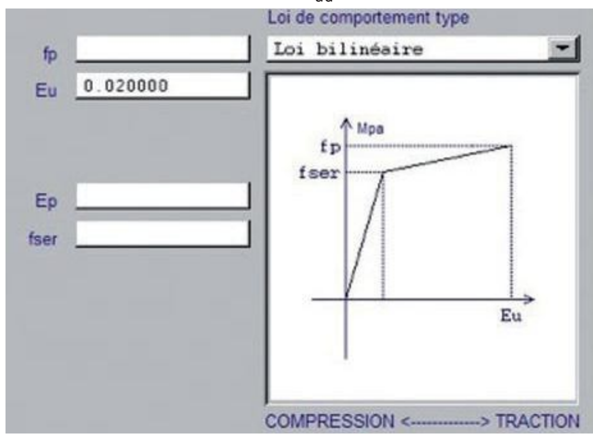


Figure 13a : Panneau CDS de la loi bilinéaire

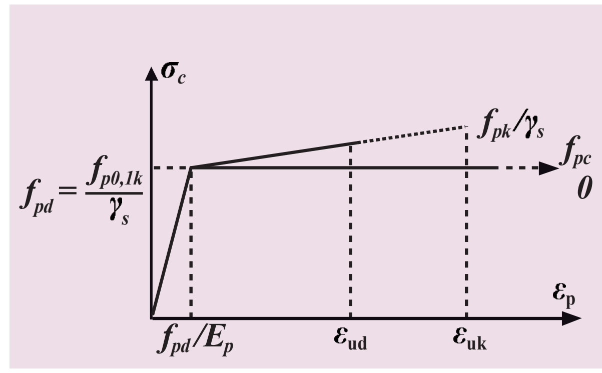


Figure 13b : Loi de comportement acier de précontrainte ELU de type bilinéaire (avec ou sans raffermissement)

Dans les deux cas, γ_s est pris égal à 1.15 ou à 1.00 suivant que l'on a choisi une loi vis-à-vis des combinaisons fondamentales ou accidentelles dans le sous-panneau EC2. De même, E_p est pris égal à 205 000 MPa pour les barres et fils et à 195 000 MPa pour les torons.

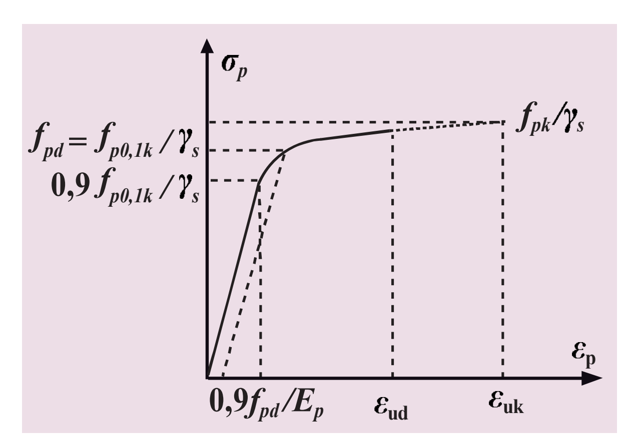


Figure 14 : Loi de comportement « réelle » de l'acier de précontrainte

Signalons par ailleurs que l'Eurocode indique $f_{p0,1k}$ = 0.9 f_{pk}. Ainsi, pour un toron de classe 1860, on obtient $f_{p0,1k}$ = 1674 MPa. Cependant, il est à noter que, si l'on se « réfère » au projet de norme NF EN 10138-3, on trouve $F_{p0,1}$ = 246 kN pour un toron T15S de 150 mm² de section, soit :

$$f_{p0,1k} = \frac{F_{p0,1}}{150.10^{-6}} = 1640 MPa$$

Dans ce cas, c'est la condition 0.9 $f_{p0,1k}$ qui devient la plus restrictive (au lieu de 0.8 f_{pk}) pour la contrainte maximale dans les aciers de précontrainte lors de la mise en tension…

Loi de comportement « réelle »

Il est également possible d'utiliser une loi représentant le diagramme réel du comportement des aciers de précontrainte.

Cette loi est linéaire de pente E_p pour :

$$\sigma_p \leq 0.9 \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s}$$

Et d'expression :

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} + 100\left(\frac{\sigma_p}{f_{p0,1k}} - 0.9\right)^5$$

pour

$$\sigma_p \geq 0.9 \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s}$$

Cette loi n'étant pas implémentée dans CDS, il convient, si on veut l'utiliser, de la créer manuellement à l'aide de l'outil de création d'une loi quelconque, en rentrant point par point les couples de valeurs

$$\{\varepsilon, \sigma = f(\varepsilon)\}$$

Calcul ELS

Loi de comportement linéaire

Il faut ici renseigner f_{ser}, contrainte limite en traction de l'acier de précontrainte, qui est fixée égale à 0.8 f_{pk} par l'annexe nationale de l'EC2 pour éviter la plastification des armatures.

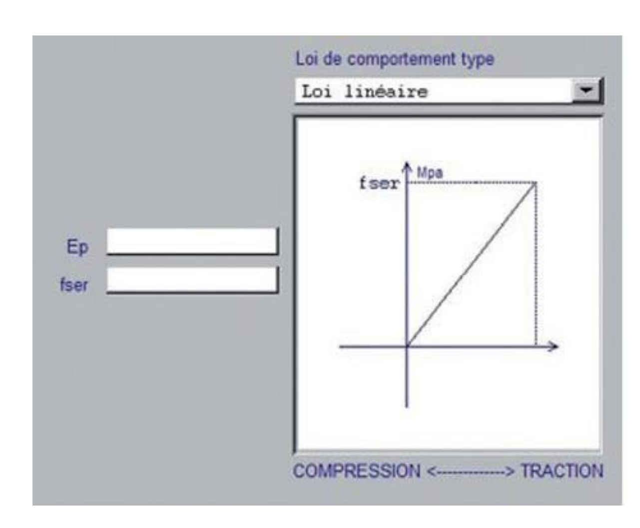


Figure 15 : Loi de comportement acier de précontrainte ELS linéaire

Il est à noter ici qu'il n'y a pas dans l'Eurocode d'équivalent au critère de limitation de la surtension dans les câbles adhérents comme on le trouve en précontrainte partielle (classe III) au sens du BPEL.

Ceci nous permet de rappeler que l'Eurocode ne fait plus appel à la notion de classe de justification comme le faisait le BPEL. L'Eurocode 2 n'a pas reconduit la définition de niveaux discontinus : il passe de façon progressive d'une précontrainte partielle à une précontrainte totale, laissant l'entière liberté au concepteur. Il se contente de fixer un niveau minimal de précontrainte en fonction des conditions d'environnement et d'indiquer ensuite comment justifier la quantité d'aciers passifs nécessaire.

Quelques incidences de l'Eurocode 2 à ne pas oublier…

L'Eurocode 2 impose des prescriptions concernant les enrobages qui ne sont pas strictement identiques à celles des règlements français. Il convient ainsi de ne pas oublier cette particularité lorsque l'on définit les coordonnées des axes des aciers passifs ou des aciers de précontrainte dans le menu « Géométrie », qui dépendent naturellement des enrobages calculés et retenus.

Enfin, le logiciel CDS retient par défaut un coefficient d'adhérence de 0.5 pour la précontrainte adhérente en post-tension lors d'une étude à l'ELS en section fissurée, et de 1.0 pour la précontrainte adhérente en prétension. Le guide d'application de l'Eurocode 2, quant à lui, préconise, pour le calcul des contraintes aux ELS dans les aciers passifs des structures à précontrainte partielle, le calcul de l'état d'équilibre de la section en pondérant la surtension $\Delta\sigma_p$ dans les armatures de précontrainte par un coefficient ξ_1 (borné supérieurement à 1,0), ce coefficient ξ_1 faisant lui-même appel au coefficient ξ (rapport de la capacité d'adhérence des armatures de précontrainte à la capacité d'adhérence des armatures de béton armé) donné par le tableau ci-dessous (ou valeur à prendre dans l'ATE).

Armatures de pré-contrainte	ξ		
	pré-tension	**post-tension, adhérentes** ≤ **C50/60**	≥ **C70/85**
Barres ou fils lisses	sans objet	0,3	0,15
Torons	0,6	0,5	0,25
Fils crantés	0,7	0,6	0,3
Barres à haute adhérence	0,8	0,7	0,35
Note : les valeurs intermédiaires entre C50/60 et C70/85 peuvent être interpolées			

Figure 16 : Tableau de l'EC2 fournissant la valeur du paramètre ξ en fonction du type d'armature de précontrainte

Son expression vaut :

$$\xi_1 = \sqrt{\xi \frac{\phi_s}{\phi_p}}$$

Avec Φ_s le diamètre de la plus grosse armature passive et Φ_p le diamètre équivalent de l'armature de précontrainte. De la sorte, ξ_1 n'est pas forcément égal à 0.5 (dans le cas général des torons). Cet aspect pourra éventuellement faire l'objet d'une amélioration ultérieure dans CDS.

Publications

• Application des Eurocodes par le maître d'ouvrage - Le programme d'un ouvrage d'art aux Eurocodes

Guide technique
Référence : 1002 - Février 2010 - 60 pages - Prix de vente : 15 euros

Ce guide présente le contenu d'un programme d'ouvrages d'art établi sur la base des nouvelles normes européennes de conception et de vérification des structures, dites Eurocodes.

Il permet ainsi au maître d'ouvrage de formuler ses exigences pour la conception et les performances de l'ouvrage dans des termes compatibles avec le référentiel normatif.

Ce guide rappelle également les obligations de la maîtrise d'ouvrage pour respecter les exigences réglementaires et pour obtenir un ouvrage de qualité.

À consulter également, sur ce thème, deux notes d'information récemment publiées sur les sites web du Sétra :
• 2010 - Application des Eurocodes – Recommandations à la maîtrise d'ouvrage, qui est une synthèse de ce guide ;
• 2010 - Application des Eurocodes – Recommandations pour l'Eurocode 8 « Calculs des structures pour leur résistance aux séismes ».

• Ouvrages édités par le LCPC

Comportement des éléments de structures en béton armé dégradés par corrosion
Référence : OA 69 - Décembre 2010 - 236 pages - Prix de vente : 50 euros



Une des causes majeures responsables de la perte de performance des ouvrages en béton armé a été identifiée comme étant la corrosion. D'un point de vue pratique, dès que les premières fissures sont remarquées, la corrosion a généralement atteint un stade avancé et des actions de maintenance doivent être lancées. Cela entraîne d'importants coûts qui auraient pu être évités si une prédiction satisfaisante avait pu être réalisée. Cette étude vise à apporter des éléments de réponse à cette problématique. Deux objectifs essentiels ont été considérés : le premier consiste à proposer des lois de comportement robustes permettant de bien décrire le comportement des éléments de structure existants et le second consiste à proposer une méthode probabiliste permettant d'actualiser les paramètres de modèles sur la base de l'information disponible sur le terrain. En outre, les différentes lois de comportement proposées ont été validées sur plusieurs cas tests. Des versions multifibres de ces lois ont aussi été développées. En particulier, une prise en compte du caractère imparfait de l'interface acier / béton au sein du formalisme multifibre a été considérée. Une méthodologie probabiliste permettant d'actualiser les paramètres d'entrée sur la base d'observations extérieures a été proposée. Sa pertinence est évaluée sur différents cas tests de structures en béton armé.

Protection et réparation des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne du béton
Référence : PROGONFLIM - Août 2010 - 141 pages - Prix de vente : 60 euros



Ces recommandations provisoires s'adressent aux maîtres d'œuvre confrontés à des ouvrages en béton atteints de réactions de gonflement interne. Elles ont pour objectif de proposer une démarche de choix de traitement pour des ouvrages atteints, soit d'une alcali-réaction, soit d'une réaction sulfatique interne. Elles pourront aboutir à l'élaboration d'un guide technique lorsque les expérimentations en cours et les retours d'expérience sur ouvrages réels auront permis de valider la démarche qui conduit au choix des solutions de traitement.

La première partie du document donne une rapide description des phénomènes. Ensuite, une méthode de choix des traitements pouvant être mis en œuvre est proposée. Cette méthode s'applique aux ouvrages dont la pathologie a déjà été identifiée et caractérisée en tenant compte : de la sévérité des gonflements passés, de l'environnement de l'ouvrage, des évolutions prévisibles de la structure non traitée et du caractère stratégique de l'ouvrage. Sur la base d'une analyse des risques, la méthode permet d'identifier la solution de traitement et de réparation la plus adaptée au cas de l'ouvrage concerné. Une description des différentes techniques de protection et de réparation envisageables est également donnée. La méthode de choix et la mise en œuvre de certains traitements sont illustrées par des cas concrets.

Essai de cisaillement à simple recouvrement pour caractériser l'adhérence de renforts composites collés sur substrat béton
Référence : ME 72 - Avril 2010 - 35 pages - Prix de vente : 25 euros



Cette méthode d'essai décrit un test de cisaillement par traction directe permettant de caractériser le joint adhésif entre un renfort externe en matériau composite et un élément de structure en béton. Ce test conduit à la détermination d'indicateurs d'efficacité du procédé, tels que la capacité maximale du joint collé en termes d'effort repris, et la longueur d'ancrage effective. Plusieurs méthodes d'exploitation des résultats sont ensuite proposées afin de répondre à la fois aux problématiques de dimensionnement des ingénieurs de génie civil et aux besoins des chercheurs.

Essais de fluage en compression, en traction et en flexion pour l'étude du comportement différé des bétons à hauts niveaux de contrainte
Référence : TMCONTBET - Janvier 2011 - 24 pages - Prix de vente : 20 euros



Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a choisi d'investir du temps et des moyens dans la mise en place de campagnes expérimentales relatives à l'étude du comportement en fluage des bétons. Cette thématique, bien qu'étudiée depuis de nombreuses années, souffre aujourd'hui encore, d'une méconnaissance des mécanismes physiques à la base de ce phénomène. Apporter des éléments nouveaux pour identifier ces mécanismes, sur la base d'expérimentations complètes et bien maîtrisées a été l'un des objectifs de l'opération de recherche 11P062 sur la «Mesure de l'impact de la fissuration sur le comportement et la durabilité des structures en composites cimentaires». Le laboratoire s'est ainsi équipé d'un ensemble de dispositifs expérimentaux pour la mise en œuvre d'essais sous chargements maintenus en compression, en traction et en flexion à différents niveaux de contrainte, dans une ambiance contrôlée en température et en humidité relative. Ce document présente les choix technologiques faits pour la mise en place de ces nouveaux dispositifs.

Coordonnées des rédacteurs

Jean-Christophe Carles
CETE Méditerrannée
Tél. : 04 42 24 76 86

Renaud Léglise
CETE NP/INFRA/OA
Tél. : 03 20 49 63 63

Fernando Dias
Sétra/CTOA DGOI
Tél. : 01 46 11 32 78

Angel-Luis Millan
Sétra/CTOA DCSL
Tél. : 01 46 11 32 41

Le catalogue des publications et logiciels du Sétra est consultable sur internet et le réseau i2 du ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.

Vous y trouverez :

- les dernières parutions,
- les ouvrages disponibles, avec résumé, référence, prix de vente…,
- les modalités de commande.

Retrouver également en téléchargement (au format PDF) les numéros précédents du Bulletin Ouvrages d'art.

sur internet : **http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr**

sur i2 : **http://intra.setra.i2**

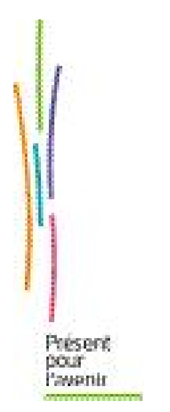
Page laissée blanche intentionnellement



Ce bulletin est un périodique d'information à l'intention des spécialistes d'ouvrages d'art. Il est destiné à décrire la construction d'ouvrages marquants et à faire connaître des techniques particulières ou innovantes.

Ce bulletin est consultable et téléchargeable :

- sur internet : http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr
- sur i2 (réseau du Ministère) : http://intra.setra.i2



Service d'études
sur les transports,
les routes et leurs
aménagements

46 avenue Aristide Briand
BP 100 - 92225 Bagneux
Cedex - France
tél : 33 (0)1 46 11 31 31
fax : 33 (0)1 46 11 31 69

46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex - France
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 53 - télécopie : 33 (0)1 46 11 33 55

Référence : **BOA 64**

*Couverture - crédit photos : Fernando Dias (Sétra) ;
vignettes : Fernando Dias (Sétra), Cete Méditerranée - Sétra, Gérard Forquet (Sétra)
Conception graphique - mise en page : SCEI - 50/54 bd du Colonel Fabien - 94200 Ivry-sur-Seine*

ISSN : 1266-166X

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique du Meeddm



Ce bulletin est publié sur le site du Sétra : www.setra.developpement-durable.gouv.fr